



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## TEPELNÝ PRŮTOKOMĚR

THERMAL MASS FLOWMETER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Albert Mičoch

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Albert Mlčoch

**ID:** 203296

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Tepelný průtokoměr

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je nalezení matematického modelu snímače včetně experimentálního určení jeho konstant, popisujícího chování snímače průtoku kapalin založeného na principu tepelného anemometru. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Vypracujte literární průzkum používaných matematických modelů pro popis tepelných anemometrů.
- 2) Na poskytnutém vzorku čidla snímače průtoku proveďte sérii experimentů s cílem určit konstanty zvoleného matematického modelu a ověřit dosažitelný rozsah a přesnost snímače průtoku s tímto čidlem. Naměřené výsledky diskutujte.
- 3) Navrhněte a diskutujte vhodné úpravy konstrukce čidla, aby bylo možné dosáhnout rozsah měření průtoku vody až 5 l/min a chybu měření 0,5 %. Pro návrh úprav se předpokládá využití vhodného simulačního sw.
- 4) Navrhněte a realizujte elektronický modul pro tepelný anemometr, umožňující provoz čidla průtoku v režimu konstantní teplota, konstantní proud a konstantní rozdíl teplot. Výstupní signál modulu volitelně napěťový nebo digitální.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

BAKER, R.C. Flow measurement handbook. Cambridge University Press, New York, 2000.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá ověřením matematického modelu termoanemometrického snímače průtoku vody podle Kingovy rovnice. V krátkosti je popsán model a měřicí aparatura. Práce se zabývá především samotným měřením a jeho vyhodnocením. V závislosti na naměřených datech je model postupně upravován. Ve zhodnocení měření jsou shrnuty dosavadní poznatky a naměřená přesnost modifikovaného modelu snímače.

Dále se práce zabývá simulací pozorovaných dějů v programu COMSOL Multiphysics, popisu fungování tohoto programu a výsledky provedených simulací. V poslední části je navržena elektronika snímače.

## **Klíčová slova**

Termo-anemometr, Kingova rovnice, odporový teploměr, hmotnostní průtok, přestup tepla

## **Abstract (English)**

The thesis deals with verification of the mathematical model of a thermoanemometric sensor of water flow according to the King's equation. The model and measuring apparatus are briefly described. The paper deals mainly with measurement and its evaluation. The model is gradually modified depending on the measured data.

The measurement evaluation summarizes the current knowledge and measurement accuracy of a modified sensor model.

Another part of this paper deals with the simulation of observed processes in COMSOL Multiphysics simulation software, how this software works and its outcomes.

In the final part of this paper, the electronic circuit of the sensor is designed.

## **Keywords**

Thermoanemometer, King's equation, resistance thermometer, mass flow, heat transfer

## Bibliografická citace práce

Citace tištěné práce:

MLČOCH, Albert. *Tepelný průtokoměr*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127083>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš.

Citace elektronického zdroje:

MLČOCH, Albert. *Tepelný průtokoměr* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127083>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tepelný průtokoměr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 7.6 2020

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš Ph.D. za veškerý čas, který této práci věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiří Fialka Ph.D. za pomoc se zprovozněním měřicí aparatury a Ing. Jakub Krejčí za pomoc s programem COMSOL.

V Brně dne: 7.6 2020

.....

podpis autora

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Rozbor .....	10
2.1. Druhy proudění a podobnostní čísla .....	10
2.2. Matematický model snímače .....	11
2.3. Zkoumaný snímač .....	13
2.4. Provozní módy termoanemometru .....	13
2.5. Určení skutečných parametrů platinových snímačů teploty .....	14
2.6. Výpočet teploty odporového teploměru .....	14
2.7. Určení parametru A .....	15
2.8. Určení parametru B .....	16
2.9. Hustota a tepelná vodivost vody .....	16
2.10. Referenční průtokoměr MASS2100 .....	17
3. Provedená měření .....	18
3.1. Parametr A u prvního snímače .....	18
3.2. Parametr B u prvního snímače .....	20
3.3. Teplotní závislost snímačů teploty a jejich kalibrace .....	25
3.4. Časové konstanty snímačů .....	28
3.5. Opětné měření A a B pro upravené podmínky .....	30
3.6. Parametry A a B pro druhý snímač .....	35
3.7. Tlakové ztráty a Reynoldsovo číslo .....	35
4. Vyhodnocení naměřených dat .....	40
4.1. Rozdělení charakteristiky .....	42
4.2. Zhodnocení měření .....	43
5. Simulace v programu COMSOL .....	44
5.1. Způsob modelování proudění v programu COMSOL .....	44
5.2. Časové a statické studie průtoku .....	44
5.3. Simulace v rovné trubce .....	45
5.4. Simulace proudění v trubičce snímače .....	48
5.5. Tepelné toky v programu COMSOL .....	53
5.6. Zhodnocení provedených simulací .....	56
6. Elektronika .....	57
6.1. Měřicí můstky .....	57
6.2. Diferenční AD převodník MCP3302/04-B .....	58
6.3. Procesor ATmega328p .....	58
7. Závěr .....	60
8. Seznam tabulek .....	63
9. Seznam literatury .....	64

10.	Seznam příloh .....	66
10.1.	Měření .....	66
10.2.	Simulace .....	66
10.3.	Program.....	66



## 1. Úvod

Práce se bude zabývat návrhem tepelného průtokoměru (anemometru) pro průtoky vody v rozsahu do 5 l/min. Průtokoměr by měl být jednoduchý a levný na výrobu i kalibraci. Parametry modelu by měly být časově stabilní a nezávislé na změně okolních podmínek (např. teploty vody, teploty prostředí), což bude vyžadovat fyzikální rozbor a vysvětlení pozorovaných jevů. Požadovaná přesnost je 0,5%. V práci rozeberu proudění kapalin a přenos tepla, zvolený matematický model vycházející z Kingovy rovnice a měřicí aparaturu.

Dále budou ukázány výsledky měření parametrů snímače. Práce se zaměří zejména na nalezené anomálie v charakteristice snímače a jejich možné příčiny, zjištěné závislosti budou diskutovány. Dále se práce bude zabývat zpřesněním matematického modelu pro použitou geometrii snímače, možnými úpravami tohoto modelu a působícími parazitními vlivy.

Děje v trubičce snímače budou zkoumány pomocí simulačního softwaru a výsledky simulací budou diskutovány.

Na závěr bude navržen elektronický modu, který bude schopen realizovat měření průtoku ve zvolených módech anemometru.

## 2. Rozbor

### 2.1. Druhy proudění a podobnostní čísla

Průtoky v potrubí dělíme na lineární a turbulentní. Laminární proudění je takové, při kterém se veškerá tekutina v potrubí pohybuje přímým směrem. Rychlostní profil v potrubí je parabolický, nejrychleji se tekutina pohybuje ve středu potrubí, směrem k okrajům rychlost klesá. To je způsobeno třecími silami mezi stěnami potrubí a tekutinou v potrubí. Tlakové ztráty v tomto typu proudění rostou lineárně s rychlostí proudění.

Od určité rychlosti proudění se uplatňují setrvačné síly v tekutině a jejich vlivem se může původní rychlostní profil rozptýlit, částice v tekutině se mohou pohybovat jinými směry, než je směr celkového proudu, tím přispívají k výrazným tlakovým ztrátám. Takové proudění nazýváme turbulentní, tlakové ztráty v něm rostou kvadraticky s rychlostí.

Pro určení druhu proudění se užívá tzv. Reynoldsovo číslo. Jedná se o podobnostní číslo, číslo je bezrozměrné a vyjadřuje poměr setrvačných sil k silám třecím.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (\text{r. 1})$$

kde  $Re$  je hodnota Reynoldsova čísla [-]  
 $\rho$  je hustota tekutiny [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $v$  je rychlost proudění [ $\text{m/s}$ ]  
 $D$  je vnitřní průměr kruhového potrubí [ $\text{m}$ ]  
 $\eta$  je dynamická viskozita tekutiny [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]  
 $\nu$  je kinematická viskozita tekutiny [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Přechod od laminárního proudění k turbulentnímu nastává pro hodnoty Reynoldsova čísla přibližně  $2320 < Re < 4000$ . Přechod probíhá skokově, přesná hodnota  $Re$ , při které dojde k přechodu je závislá zejména na tvaru potrubí, hrubosti jeho povrchu a dalších poruchových jevech, které mohou narušit laminární proudění.

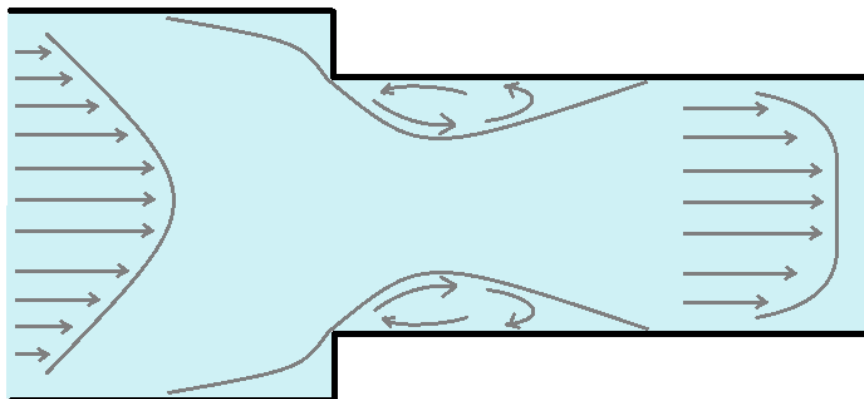
Pro určení, jaký typ přenosu tepla převládá v tekutině je definováno Prandtlovo podobnostní číslo. Popisuje vztahy mezi rychlostí a teplotním polem. [5]

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (\text{r. 2})$$

kde  $Pr$  je Prandtlovo číslo [-]  
 $c_p$  je měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $\eta$  je dynamická viskozita [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]  
 $\lambda$  je tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

Pro malé hodnoty Prandtlova čísla ( $Pr \ll 1$ ) dochází převážně k přenosu tepla prouděním. Pro velká Prandtlova čísla ( $Pr \gg 1$ ) dochází převážně k přenosu tepla vedením. U vody se hodnota Prandtlova čísla pohybuje mezi 1 a 10 v závislosti na teplotě. [3]

V trubičce měřeného snímače dochází k výraznému snížení průřezu oproti zbytku potrubí, může tedy docházet k nežádoucím jevům, jako je víření u stěn trubičky. Vzdálenost dosahu víření se zvětšuje s rychlostí proudění. [5]



Obr. 1: Redukce průměru potrubí [5]

## 2.2. Matematický model snímače

Snímač pracuje na principu vyhodnocení tepelných ztrát vyhřívaného tělíska, respektive na potřebném dodaném výkonu k jeho vyhřívání. Hledaný matematický model tedy musí zahrnovat veškeré tepelné ztráty, respektive výkonové, ztráty na vyhříváním tělíska. Tepelné ztráty se dají rozdělit na ztráty vedením tepla a ztráty prouděním tepla odvedeného do měřené tekutiny (vody).

Ztráty vedením tepla vznikají jednak odvedením tepla do kapaliny, dále do trubičky snímače, do vzduchu a do přírodních kabelů. Tyto ztráty jsou pro ustálený stav snímače konstantní a jejich součet bude dále označován jako parametr  $A$  [W/K]. Ustáleným stavem snímače se rozumí stav, kdy nedochází ke změnám teplot vody, snímače, ani okolního prostředí a nedochází k proudění vody.

Pro ztráty vedením můžeme psát:

$$P_v = \sum S_i \lambda_i \cdot \frac{\Delta T_i}{d_i} \quad (\text{r. 3})$$

kde  $P_v$  je ztrátový výkon vedením tepla [W]

$S_i$  jsou velikosti ploch, kterými je z vyhřívaného tělíska odváděno teplo [m<sup>2</sup>]

$\lambda_i$  jsou tepelné vodivosti prostředí v okolí vyhřívaného tělíska [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]

$\Delta T_i$  jsou rozdíly teplot vyhřívaného tělíska a okolních prostředí [K]

$d_i$  jsou hloubky těchto prostředí z pohledu vyhřívaného tělíska [m]

Tento vztah je jen velmi přibližný, pro pochopení odvodu tepla bude pro účely této práce dostatečný. Za předpokladu neměnných, nebo známých okolních podmínek (zejména teploty prostředí), lze počítat pouze s rozdílem teploty měřeného prostředí (vody) a vyhřívaného tělíska. Vztah tedy upravíme na:

$$P_v = \Delta T \cdot \sum \frac{S_i \lambda_i}{d_i} = \Delta T \cdot A \quad (\text{r. 4})$$

Ztráty tepla prouděním vznikají při nenulové rychlosti vody v trubičce snímače, předpokladem je, že odvod tepla prouděním nebude ovlivňovat odvod tepla vedením a parametr A tedy zůstane konstantní. Odvod tepla prouděním tedy zapříčiní zvětšení výkonu potřebného k udržení konstantní teploty vyhřívaného tělíska, případně dojde za konstantního výkonu ke snížení teploty tělíska.

Pro ztráty prouděním platí [6]:

$$P_p = K \cdot \lambda \cdot Pr^m \cdot Re^n \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{r. 5})$$

kde  $P_p$  je ztrátový výkon způsobený prouděním [W]  
 $K$  je empiricky zjištěný parametr snímače [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $\lambda$  je tepelná vodivost prostředí (vody) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $Pr$  je Prandtlovo číslo, viz (r. 1) [-]  
 $m$  je empiricky zjištěný parametr snímače [-]  
 $Re$  je Reynoldsovo číslo, viz (r. 2) [-]  
 $n$  je empiricky zjištěný parametr snímače [-]  
 $S$  je povrch vyhřívaného tělíska v kontaktu s měřeným médiem [ $\text{m}^2$ ]  
 $\Delta T$  je rozdíl teplot vyhřívaného tělíska a měřeného média [K]

Z rovnic (r. 1) a (r. 5), za předpokladu  $n = 0,5$ , plyne:

$$P = K \cdot \lambda \cdot Pr^m \cdot S \cdot \sqrt{\frac{D}{v}} \cdot \sqrt{v} \cdot \Delta T = B \cdot \sqrt{v} \cdot \Delta T \quad (\text{r. 6})$$

Předpokládaný tvar Kingovy rovnice tedy je:

$$P = P_v + P_k = \Delta T \cdot (A + B \cdot \sqrt{v}) \quad (\text{r. 7})$$

kde  $P$  je celkový ztrátový výkon na vyhřívaném tělísku [W]  
 $\Delta T$  je rozdíl teploty média a teploty vyhřívaného tělíska [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $A$  jsou tepelné ztráty na vyhřívaném tělísku způsobené vedením tepla (tedy za nulového průtoku) [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $B$  je parametr pro ztráty způsobené prouděním média [ $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \text{s}^{1/2} \text{m}^{-1/2}$ ]  
 $v$  je rychlost proudění vody [m/s]

odtud pak přes vztah:

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot S \quad (\text{r. 8})$$

kde  $Q_m$  je hmotnostní průtok [kg/s]  
 $\rho$  je hustota média (vody) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$S$  je průřez trubky, u zkoumaného snímače  $8 \text{ mm}^2 [\text{mm}^2]$   
plyne výsledný vztah pro hmotnostní průtok:

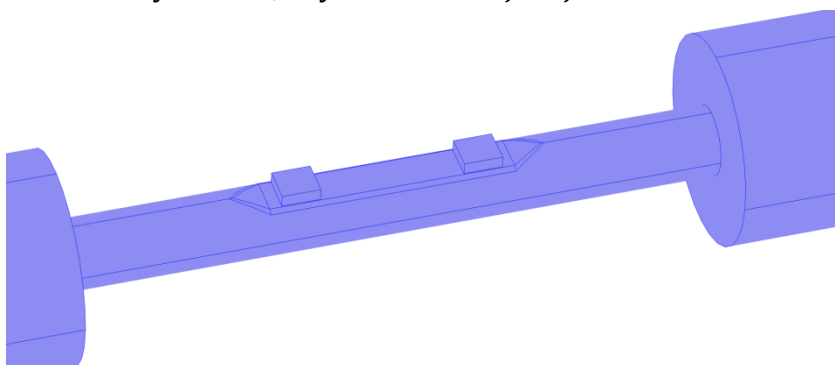
$$Q_m = \rho \cdot S \cdot \left( \frac{P - \Delta T \cdot A}{\Delta T \cdot B} \right)^2 \quad (\text{r. 9})$$

Výhodou tohoto modelu je relativně jednoduché stanovení jeho parametrů. Parametr  $A$  je možné získat měřením za nulového průtoku, parametr  $B$  pak pomocí známého průtoku a již stanoveného parametru  $A$ .

### 2.3. Zkoumaný snímač

Snímač s označením P1K0/050.232.2K.C.050.M.U.S od firmy IST je tvořen dvěma platinovými odporovými snímači teploty s odpory  $R_{\text{cool}} = 1000 \, \Omega$  (referenční snímač teploty vody) a  $R_{\text{hot}} = 50 \, \Omega$  (vyhřívaný snímač) v třídě přesnost C (někdy označováno 2B) s tolerancí  $\Delta T = \pm 0,6 + 0,01 \cdot |T|$ , je tedy nutná kalibrace.

Oba platinové teploměry jsou nalepeny na malé nerezové trubičce, pro kontrolu nezávislosti  $R_{\text{cool}}$  na  $R_{\text{hot}}$  je mimo samotný snímač na měřicím potrubí přítomen kontrolní odporový teploměr  $R_{\text{ref}}$ , který je na potrubí umístěn v dostatečné vzdálenosti od měřených čidel, aby nemohlo dojít k jeho ovlivnění.



Obr. 2: Model trubičky snímače

### 2.4. Provozní módy termoanemometru

Termoanemometry lze provozovat ve čtyřech módech a to:

1. S konstantní teplotou  $R_{\text{hot}}$
2. S konstantním proudem na  $R_{\text{hot}}$
3. S konstantním napětím na  $R_{\text{hot}}$
4. S konstantním rozdílem teplot na  $R_{\text{hot}}$

Mód konstantní teploty nebyl vyhodnocen jako vhodný, tento mód je problematický z hlediska změny teploty kapaliny. Při ohřevu kapaliny dochází ke snížení rozdílu teplot mezi  $R_{\text{hot}}$  a  $R_{\text{cool}}$ , což vede ke snížení citlivosti snímače, v případě ochlazení media naopak k velké spotřebě snímače.

V režimu konstantního proudu dochází také ke snížení citlivosti, u tohoto režimu je citlivost závislá na průtoku. Při vyšším průtoku je rezistor  $R_{hot}$  více ochlazován, což opět vede ke snížení rozdílu teplot. Při nastavení vysokého proudu rezistorem dochází k jeho přehřátí pro nulové průtoky a též k vysoké spotřebě snímače. Režim konstantního napětí se chová podobně jako režim s konstantním proudem.

Jako vhodný byl tedy vyhodnocen pouze režim s konstantním rozdílem teplot, který by neměl ztrácet citlivost s rostoucím průtokem, ani teplotou média. Zde ovšem hrozí kladná zpětná vazba, pokud by byla teplota  $R_{cool}$  zvyšována přestupem tepla z  $R_{hot}$ . Tento parazitní vliv lze buďto odfiltrovat řídicím algoritmem, nebo pro malé průtoky, kde se přenos tepla může projevit, lze přejít například do režimu s konstantní teplotou, nebo snížit rozdíl teplot. V úvahu je poté třeba brát naposled změřenou teplotu média a podle ní nastavit drženou konstantní teplotu.

## 2.5. Určení skutečných parametrů platinových snímačů teploty

Jelikož jsou použité platinové snímače teploty třídy přesnosti pouze C, je nutné určit jejich skutečné parametry. Ze vztahu pro platinové teplotní snímače vyplývá nutnost určení odporu při jasně stanovené teplotě (vhodné je  $T=0^{\circ}\text{C}$ ), koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  jsou dány normou ČSN EN 60751 [1] (v normě značeny A, B, zde pro přehlednost  $\alpha$  a  $\beta$ ):

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T + \beta \cdot T^2) \quad (\text{r. 10})$$

kde  $R_0$  je odpor platinového teploměru při  $0^{\circ}\text{C}$  (273,15 K)  $[\Omega]$

$R_t$  je odpor při teplotě  $T$   $[\Omega]$

$\alpha$  je koeficient změny odporu prvního řádu,  $\alpha = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

$\beta$  je koeficient změny odporu druhého řádu,  $\beta = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$

Měření lze provést v kalibrační peci, která má rozsah i pro záporné hodnoty teploty (v  $^{\circ}\text{C}$ ).

Pro hodnoty do  $100^{\circ}\text{C}$  lze využít zjednodušený vztah:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (\text{r. 11})$$

Význam znaků zůstává zachován,  $\alpha = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

## 2.6. Výpočet teploty odporového teploměru

Pro určení teploty na odporovém teploměru využijeme již zmíněné normy ČSN EN 60751.

Z rovnice (r. 10) vyjádřením dostaneme:

$$T = \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4 \cdot \beta \cdot \frac{R_0 - R}{R_0}}}{2 \cdot \beta} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{r. 12})$$

V rovnici se vždy uvažuje jako správný ten kořen, který je fyzikálně reálný.

Pro příklad:

Měření na druhém zkoušeném snímači, Parametr A, 27.9.2019, první řádek tabulky (z přílohy 10.1):

Čidlo KTG2 - referenční,  $R_0 = 1002,3 \, \Omega$ ,  $R = 1093,05 \, \Omega$ , parametry  $\alpha$  a  $\beta$  vzaty z normy.

$$T_{1,2} = \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4 \cdot \beta \cdot \frac{R_0 - R}{R_0}}}{2 \cdot \beta}$$

$$= \frac{-3,908 \cdot 10^{-3} \pm \sqrt{(3,908 \cdot 10^{-3})^2 - 4 \cdot (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot \frac{1002,3 - 1093,05}{1002,3}}}{2 \cdot (-5,775 \cdot 10^{-7})}$$

$$T_1 = 24,49^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 6743,13^\circ\text{C}$$

Uvažuje se pouze kořen  $T_1$ .

Pro správné určení teploty je třeba uvažovat odpor přívodních vodičů u čidla KTG2, protože je zapojeno pouze dvouvodičově. Výrobce čidla udává odpor přívodních vodičů jako  $0,07 \, \Omega/\text{m}$ . [2] Nutno podotknout, že datasheet k modelu KTG2/C nebyl nalezen a byly převzaty parametry od obdobného snímače KTG2/R. Dále je třeba uvažovat vliv samoohřevu snímačů měřicím proudem.

## 2.7. Určení parametru A

Konstanty A a B se měří separátně. Při měření se vyhřívá  $R_{\text{hot}}$  a dopočítá se jeho odpor, teplota a dodávaný příkon. Teplota média se měří pomocí  $R_{\text{ref}}$ , teplota měřená na  $R_{\text{cool}}$  se porovnává s teplotou referenční. Předpokládá se přestup tepla z  $R_{\text{hot}}$  na  $R_{\text{cool}}$ . Závislost tohoto přestupu bude třeba kompenzovat.

Při určení konstanty A je nutné měřit více hodnot za nulového průtoku s měnícím se rozdílem teplot. Kingova rovnice se pro nulový průtok zjednoduší na tvar:

$$P = \Delta T \cdot A \quad (\text{r. 13})$$

Odtud lze získat (za předpokladu lineární závislosti) konstantní parametr A:

$$A = \frac{dP}{d(\Delta T)} \quad (\text{r. 14})$$

Pro správné určení A je nutné nechat systém teplotně ustálit pro každé  $\Delta T$ .

## 2.8. Určení parametru B

Pro určení parametru B je třeba znát parametr A a měřit průtok referenčním průtokoměrem.

Parametr B potom získáme výpočtem vycházejícím z (r. 9):

$$B = \sqrt{\frac{\rho \cdot S}{Q_m}} \cdot \left( \frac{P - \Delta T \cdot A}{\Delta T} \right) \quad (\text{r. 15})$$

Při měření se snažíme zachovat konstantní  $\Delta T$ , ideálně i teplotu média a okolí. V průběhu celého měření se tedy mění pouze průtok  $Q_m$ .

## 2.9. Hustota a tepelná vodivost vody

Při měření se ukázala nutnost brát v úvahu i měnící se parametry média. Byly tedy sestaveny funkční závislosti hustoty a vodivosti vody v závislosti na změně teploty vody. Tyto aproximace jsou jen přibližné, protože není známo přesné rozložení teploty v kapalině poblíž vyhřívaného snímače, měřit lze pouze teplota média před snímačem.

**Tab. 1: Změny tepelné vodivosti a hustoty vody v závislosti na teplotě [3], [4]**

T [°C]	$\lambda_T$ [W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]
10	0.581	999.701
20	0.599	998.205
40	0.632	992.220
60	0.655	983.200
80	0.671	971.790
100	0.68	958.350

T [°C] je teplota vody,  $\lambda_T$  [W·m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>] je součinitel tepelné vodivosti za dané teploty,

$\rho$  [kg·m<sup>-3</sup>] je hustota vody za dané teploty

Z těchto hodnot byly sestaveny následující závislosti (pro měřený rozsah teplot jsou dostatečnou aproximací):

$$\rho = -0,0033T^2 - 0,1022T + 1001,3 \quad (\text{r. 16})$$

$$\lambda_T = -0,00001T^2 + 0,0022T + 0,5597 \quad (\text{r. 17})$$



## 2.10. Referenční průtokoměr MASS2100

Jako referenční průtokoměry byly použity dva různé MASS2100 na principu Coriolisovy síly. Trubici v měřicím přístroji rozkmitáme na rezonanční kmitočet, v případě nenulového průtoku dochází vlivem Coriolisovy síly k vychylování trubky na koncích. Je možné měřit tyto silové účinky a z nich určit přímo hmotnostní průtok. Jako referenční byly vybrány proto, že se jedná o velmi přesné přístroje s přesností až 0,1% z aktuálního průtoku. Jejich nevýhodou je vysoká tlaková ztráta, která znemožňuje využít celý rozsah přístrojů s čerpadlem, které je k dispozici.

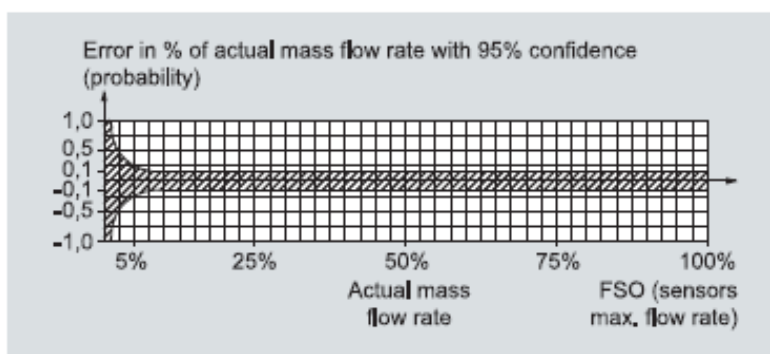
Rozsahy: 1000 kg/h a 250 kg/h.

$$E = \pm \sqrt{(0,10)^2 + \left(\frac{Z \times 100}{qm}\right)^2}$$

E = Error [%]

Z = Zero point error [kg/h]

qm = Mass flow [kg/h]



Obr. 3: Chyba měření přístroje MASS2100

Jak je vidět z Obr. 3, snímač je dostatečně přesný od zhruba 5% svého rozsahu, což odpovídá 50 kg/h pro rozsah 1000 kg/h a 12,5 kg/h pro rozsah 250 kg/h. Při měření je tedy žádoucí měřit až nad těmito průtoky.

Varianta s referenční váhou byla zavržena zejména pro zjištění zmenšení průtoku v průběhu měření. Tato změna je zřejmě způsobena poklesem hydrostatického tlaku v nádrži při přečerpávání vody do odvažovací nádrže.

### 3. Provedená měření

Po zprovoznění aparatury v průběhu srpna mohla začít měření. Byla provedena tato měření:

1. Parametr A u prvního snímače
2. Parametr B u prvního snímače
3. Teplotní závislost snímačů teploty a jejich kalibrace
4. Časové konstanty snímačů
5. Opětné měření A a B pro upravené podmínky - tepelně izolovaný snímač
6. Parametry A a B pro druhý snímač
7. Tlakové ztráty a Reynoldsovo číslo

Mezi jednotlivými body měření byla naměřená data průběžně vyhodnocována a model snímače byl upravován.

#### 3.1. Parametr A u prvního snímače

Za nulového průtoku byl snímač  $R_{hot}$  (P0K050) vyhříván a byla počítána jeho teplota dle vztahu (r. 11).

Podmínky v laboratoři:

Teplota: 25,3 až 25,6 °C      Tlak: 98,53 kPa      Vlhkost: 50%

Měření provedeno dne 19.8.2019.

**Tab. 2: Měření parametru A na snímači P0K050**

P0K050 - měřeno		spočteno		
U [V]	I [mA]	$R_{hot}$ [Ohm]	$T_{hot}$ [°C]	$P_{hot}$ [W]
0,0237	0,4294	55,19	26,12	0,010
0,0562	1,0170	55,26	26,47	0,057
0,1113	2,0113	55,34	26,87	0,224
0,2786	5,0336	55,35	26,92	1,402
0,5573	10,0400	55,51	27,75	5,595
1,1202	19,9710	56,09	30,77	22,372
1,7738	31,0500	57,13	36,14	55,076
2,9555	49,6420	59,54	48,61	146,717
3,6900	60,1180	61,38	58,16	221,835
4,4312	69,9200	63,38	68,50	309,830
5,3614	81,2550	65,98	82,00	435,641
6,1094	89,5510	68,22	93,60	547,103

Obdobným způsobem byly změřeny i “chladný” odporový snímač  $R_{cool}$  (P1K0) a referenční odporový snímač  $R_{ref}$  (KTG2/C-30). U těchto čidel byl držen konstantní příkon odpovídající režimu měření teploty (pro oba rezistory  $U \approx 0,49$  V;  $I \approx 0,45$  mA).

**Tab. 3: Naměřené teploty pro všechny snímače a jejich rozdíly teplot**

$T_{hot}$ [°C]	$T_{cool}$ [°C]	$T_{ref}$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T_{ref}$ [°C]
26,12	25,65	26,22	0,47	-0,10
26,47	25,72	26,75	0,75	-0,28
26,87	25,97	26,69	0,90	0,18
26,92	25,91	26,81	1,01	0,11
27,75	26,12	26,63	1,63	1,12
30,77	26,82	26,51	3,95	4,26
36,14	27,87	27,16	8,27	8,97
48,61	30,74	27,16	17,88	21,45
58,16	33,08	26,51	25,08	31,65
68,50	34,96	26,51	33,53	41,99
82,00	35,25	26,51	46,75	55,49
93,60	39,42	27,16	54,19	66,44

$\Delta T$  - rozdíl teploty na  $R_{hot}$  (v tabulce teplota  $T_{hot}$ ) a teploty na  $R_{cool}$  (v tabulce teplota  $T_{cool}$ )

$\Delta T_{ref}$  - rozdíl teploty na  $R_{hot}$  a teploty na  $R_{ref}$  (v tabulce  $T_{ref}$ )

Z naměřených rozdílů teplot jasně vyplývá, že přenos tepla mezi rezistory  $R_{hot}$  a  $R_{cool}$  není zanedbatelný, teplota na  $R_{cool}$  se od teploty referenčního měřidla značně liší.

Pro získání konstanty  $A$  byla sestavena závislost příkonu  $R_{hot}$  na rozdílu teplot ze vztahu (r. 14). Byla zjištěna nelinearita naměřené závislosti, jak lze vidět z Obr. 4. Spotřebovaný výkon se řídí polynomem 2. řádu. Parametr  $A$  byl tedy stanoven jako:

$$A = A_1 \cdot \Delta T + A_0 = A_0 \left( \frac{A_1}{A_0} \cdot \Delta T + 1 \right) = A_0 (A_\alpha \cdot \Delta T + 1) \quad (\text{r. 18})$$

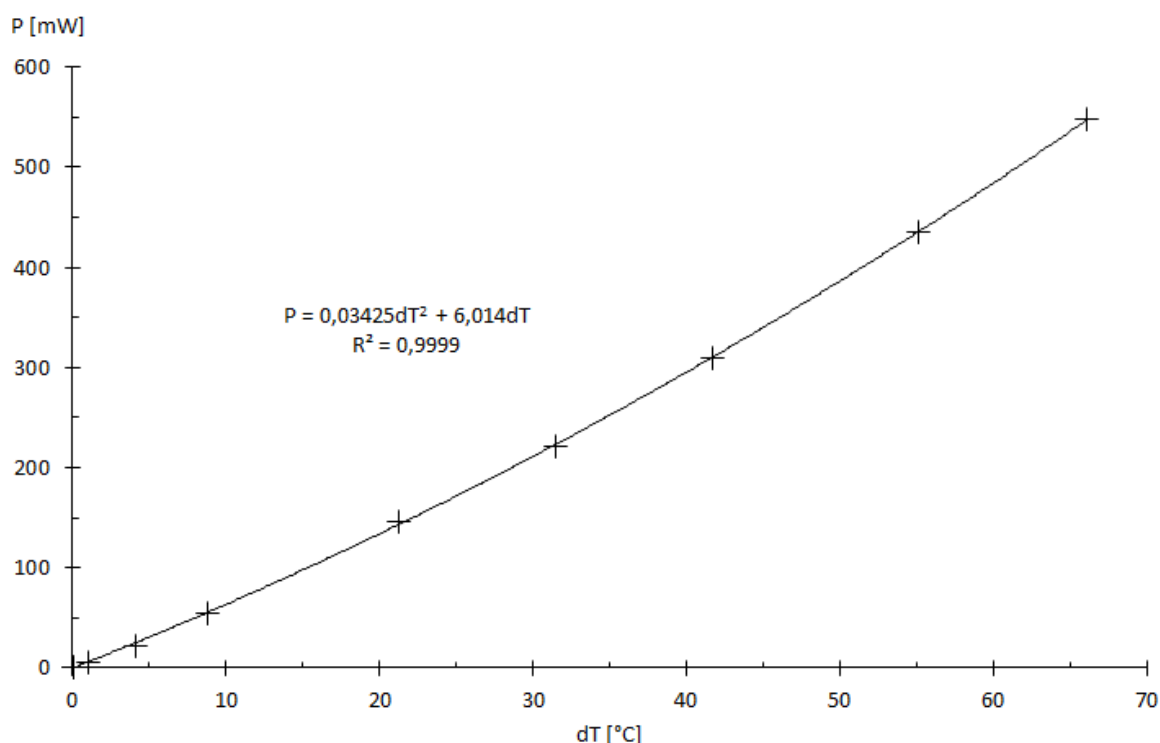
Pro měřený snímač za daných podmínek jsou konstanty:

$$A_1 = 3,425 \cdot 10^{-5} \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-2}]$$

$$A_0 = 6,014 \cdot 10^{-3} \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$$

z toho dosazením:  $A_\alpha = \frac{A_1}{A_0} = \frac{3,425 \cdot 10^{-5}}{6,014 \cdot 10^{-3}} = 5,695 \cdot 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]}$

Konstanty se liší podle kalibrace snímačů, v průběhu výzkumu se tedy jejich hodnoty mohly drobně lišit i vzhledem k okolním podmínkám (viz měření v kapitole 3.5), charakter parametrů ovšem zůstává zachován. Stejnoseměrnou složku uvažujeme za chybu měření způsobenou zejména nepřesností čidel, protože pro její existenci není fyzikální opodstatnění.



**Obr. 4: Parametr A čidla POK050 vypočtený pomocí referenčního měřidla**

### 3.2. Parametr B u prvního snímače

Při měření parametru B byl měněn průtok, při tom byl držen konstantní rozdíl teplot  $dT$ . Měření bylo provedeno pro rozdíly teplot 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 a 40°C (po následné kalibraci teploměrů se tyto diferenční teploty změní, zůstávají však konstantní pro každou z měřených závislostí).

Pro zvýšenou přesnost referenčního měření průtoku bylo měření rozděleno na dva rozsahy průtoku pro dva referenční průtokoměry. Rozsah 15-50 kg/h (0,004-0,014 kg/s) byl měřen pomocí Sitrans F C MASS2100 0-250 kg/h, rozsah 50-200 kg/h (0,014-0,055 kg/s) byl měřen pomocí Sitrans F C MASS2100 0-1000 kg/h. Pro velké tlakové ztráty nebylo možné dosáhnout u prvního jmenovaného snímače vyšších průtoků, než 50 kg/h. Rozsahy měření obou přístrojů se nepřekrývají z důvodu obavy o sníženou přesnost druhého jmenovaného přístroje při průtocích

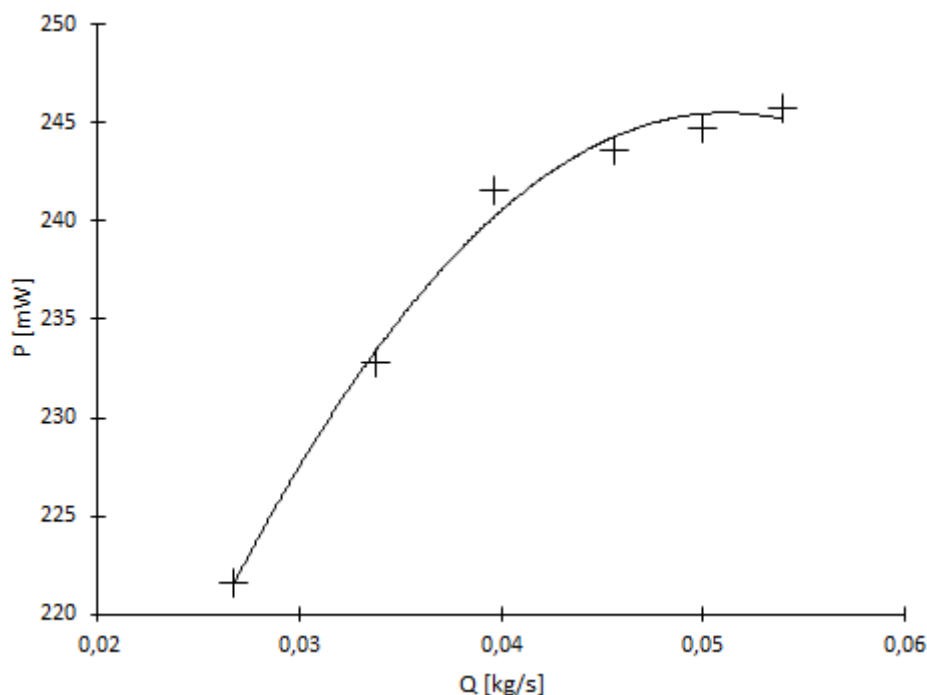
pod 5% z jeho rozsahu. Oba jsou na principu Coriolisovy síly s vyhodnocovací jednotkou MASS6000.

Pro výpočet parametru B byl užit vztah (r. 15). Pro  $dT = 5^{\circ}\text{C}$  a  $dT = 10^{\circ}\text{C}$  docházelo při nejvyšších průtocích ke ztrátě citlivosti, tyto teploty tedy byly shledány nepoužitelnými pro další měření.

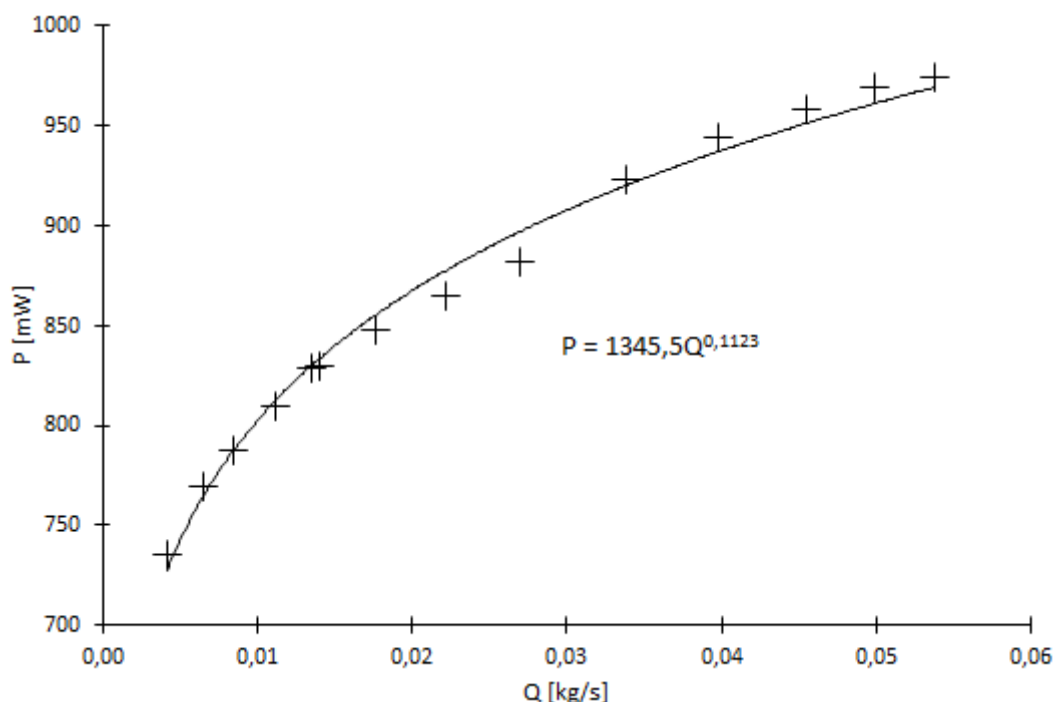
U vyšších rozdílů teplot je i pro maximální průtok citlivost snímače dostatečná. V závislosti potřebného příkonu na průtoku vody je však vidět výrazný skok. Příčina tohoto skoku bude řešena v kapitole 3.5.

Podmínky v laboratoři:

Měření bylo časově náročné a probíhalo během více dní, podmínky jsou uvedeny u naměřených hodnot v souboru s daty (Excel - P1K0\_mereni-zpracovani\_domereni.xlsx).



Obr. 5: Potřebný příkon pro  $dT = 10^{\circ}\text{C}$  v závislosti na velikosti průtoku



**Obr. 6: Potřebný příkon pro  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$  v závislosti na velikosti průtoku**

Pomocí rovnice (r. 15) určíme parametr  $B$  pro různé měřené průtoky. V důsledku ohřevu vody čerpadlem nebylo možné udržet konstantní teplotu vody a do výpočtu parametru  $B$  musely být zavedeny další parametry. Byl brán ohled na změnu hustoty a změnu tepelné vodivosti vody. Dále je již brán ohled na předchozí měření, parametr  $A$  tedy není brán jako konstantní, ale je funkcí teploty. Nový vzorec tedy je:

$$B = \sqrt{\frac{\rho \cdot S}{Q_m}} \cdot \left( \frac{P - A_0 \Delta T \cdot (A_\alpha \Delta T + 1) \cdot \frac{\lambda_T}{\lambda_0}}{\Delta T} \right) \quad (\text{r. 19})$$

kde “ $\rho$ ” je hustota vody, zde parametr závislí na teplotě dle vztahu (r. 16)

“ $\lambda_T$ ” je součinitel tepelné vodivosti vody při aktuální teplotě [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

“ $\lambda_0$ ” je součinitel tepelné vodivosti vody při teplotě, za které byla měřena konstanta  $A$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

Poměr  $\lambda_T/\lambda_0$  je tedy bezrozměrný parametr, který ukazuje změnu tepelné vodivosti v průběhu měření. Tepelná vodivost byla vypočtena ze vztahu (r. 17).

**Tab. 4: Měření parametru B pro  $dT = 37,7^{\circ}\text{C}$** 

Q [kg/s]	T <sub>ref</sub> [°C]	P [mW]	dT <sub>ref</sub> [°C]	B <sub>ref</sub> [mW·K <sup>-1</sup> s <sup>1/2</sup> m <sup>-1/2</sup> ]
0.0042	30.11	735.34	37.66	16.757
0.0065	29.52	769.75	37.59	14.483
0.0084	29.04	787.19	37.73	13.115
0.0112	28.86	809.23	37.62	11.951
0.0136	28.65	829.09	37.71	11.208
0.0141	26.52	829.54	37.70	11.037
0.0177	26.46	848.07	37.74	10.177
0.0221	26.31	864.40	37.63	9.391
0.0269	26.46	881.88	37.65	8.758
0.0338	26.46	922.82	37.75	8.312
0.0398	26.46	944.02	37.67	7.943
0.0455	26.46	957.74	37.61	7.593
0.0499	26.61	969.51	37.75	7.333
0.0537	26.61	974.21	37.75	7.116

Q [kg/s] - průtok referenčním průtokoměrem,

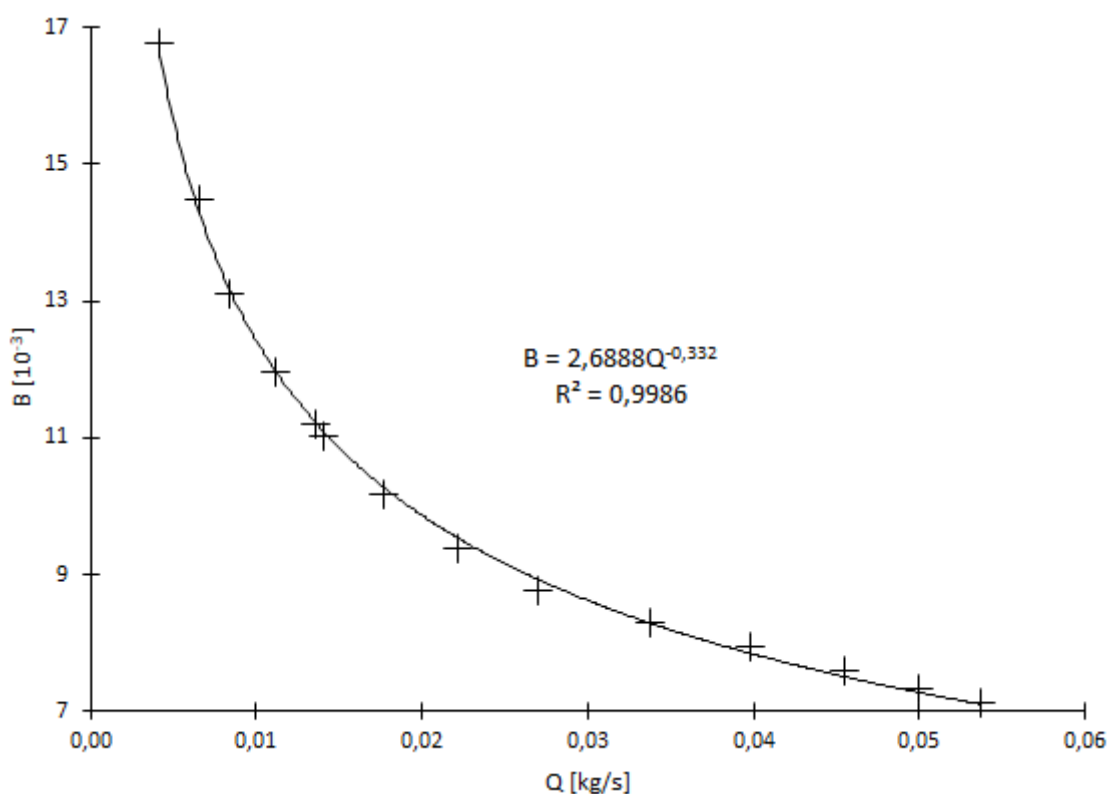
T<sub>ref</sub> [°C] - teplota měřená referenčním snímačem,

P [mW] - výkon potřebný pro udržení konstantního rozdílu teplot,

dT<sub>ref</sub> [°C] - rozdíl teplot vyhřívaného snímače a referenčního snímače,

B<sub>ref</sub> [mW·K<sup>-1</sup>s<sup>1/2</sup>m<sup>-1/2</sup>] - vypočtený parametr B

Z Tab. 4 a Obr. 7 vyplývá, že parametr B není konstantní na průtoku, ani lineárně se mění s průtokem. Jeho hodnotu nejlépe aproximuje mocninná funkce, Kingovu rovnice je tedy opět třeba upravit. Hodnota parametru B se tedy stává extrémně citlivou, protože se ve výsledném vztahu bude parametr B vyskytovat s vyšší mocninou.



**Obr. 7: Parametr B v závislosti na průtoku**

Aproximace průběhu B z Obr. 6. je ve tvaru:

$$B = B_k \cdot Q^{-B_{exp}} \left[ \frac{W \cdot \sqrt{s}}{K \cdot \sqrt{m}} \right] \quad (\text{r. 20})$$

Vztah vychází z rovnice (r. 9) - průtok z Kingovy rovnice, rovnice (r. 18) - parametr A jako polynom, z rovnice (r. 19) - výpočet parametru B a z rovnice (r. 20) - aproximace průběhu B.

$$Q_m = \left\{ \frac{S \cdot \rho_{(T)}}{\Delta T^2 B_k^2} \cdot \left[ \frac{\lambda_k}{\lambda_0} \cdot A_0 \cdot \Delta T \cdot (A_\alpha \cdot \Delta T + 1) - P \right]^2 \right\}^{\frac{1}{1-2 \cdot B_{exp}}} \quad (\text{r. 21})$$

Aproximace parametru B přesně neseď, možným důvodem je proudění vzduchu okolo čidla, možná změna proudění v trubičce snímače z laminárního na turbulentní, nebo ne dost přesné udržování konstantního rozdílu teplot, případně další dosud neznámé vlivy. V úvahu připadá i přechod od jednoho referenčního průtokoměru k druhému. Za zvážení stojí měřit celý rozsah jedním průtokoměrem i za cenu snížené přesnosti. Cílem dalšího měření bude najít a odstranit tyto chyby, případně je kompenzovat.



### 3.3. Teplotní závislost snímačů teploty a jejich kalibrace

Jak již bylo zmíněno v úvodu, použité snímače teploty mají třídu přesnosti C. Pro přesné určování teploty je nutná jejich kalibrace, ta nemá vliv na dosavadní naměřené hodnoty pro určení parametru B, poněvadž u něj je udržována konstantní teplota. Kalibrace má vliv na určení parametru A, snahou je dosáhnout nulového konstantního koeficientu (stejnoseměrné složky) v polynomu parametru A, protože pro jeho existenci není fyzikální opodstatnění.

Kalibrace proběhla v kalibrační peci AOIP Hyperon, která umožňuje jak topení, tak i chlazení. Trubička snímače byla vyjmuta z měřicí aparatury pro průtoky a upevněna na zásuvnou konstrukci kalibrační pece. Vyjmut a do pece upevněn byl i referenční snímač KTG2. Průchod do pece byl utěsněn keramickou izolační vatou pro minimalizaci velikosti gradientu teploty. Při měření se izolace ukázala neúčinná a to zejména kvůli prostupu tepla samotnými přívodními kabely. Za účelem snížení tohoto vlivu bylo do pece namotáno několik desítek centimetrů přívodních kabelů, aby se přestupující teplo po kabelech nedostalo až k měřeným snímačům. Tento vliv se však nepodařilo zcela odstranit.

Podmínky v laboratoři:

Teplota: 25,0 °C      Tlak: 98,98 kPa      Vlhkost: 56-58%

Měření provedeno 26.8 a 27.8.2019, teplota v místnosti udržována klimatizací.

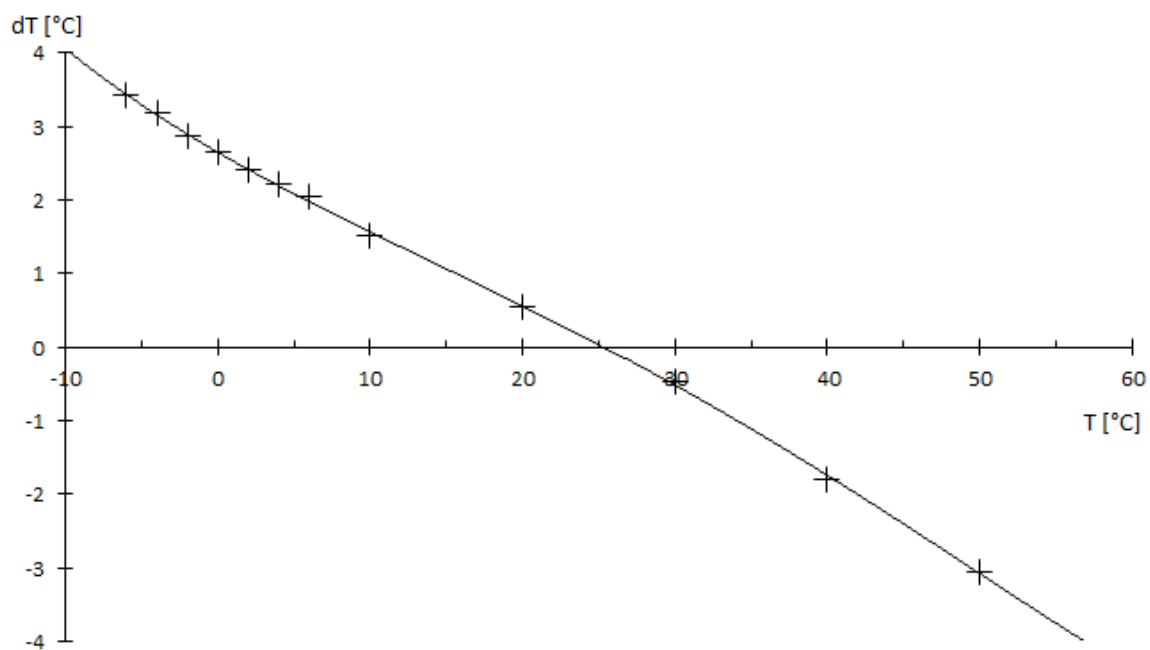
**Tab. 5: Kalibrace snímačů**

$T_{AOIP}$ [°C]	$T_{hot}$ [°C]	$T_{cool}$ [°C]	$T_{ref}$ [°C]
-10,00	-8,75	-8,90	-5,94
-6,00	-5,06	-5,13	-2,58
-4,00	-3,08	-3,17	-0,82
-2,00	-1,17	-1,38	0,87
0,00	0,81	0,60	2,64
2,00	2,73	2,60	4,40
4,00	4,66	4,58	6,21
6,00	6,58	6,60	8,04
10,00	10,33	10,44	11,51
20,00	20,15	20,19	20,55
30,00	29,73	29,97	29,52
40,00	39,03	39,38	38,20
50,00	48,61	49,05	46,94
60,00	58,05	58,41	55,59

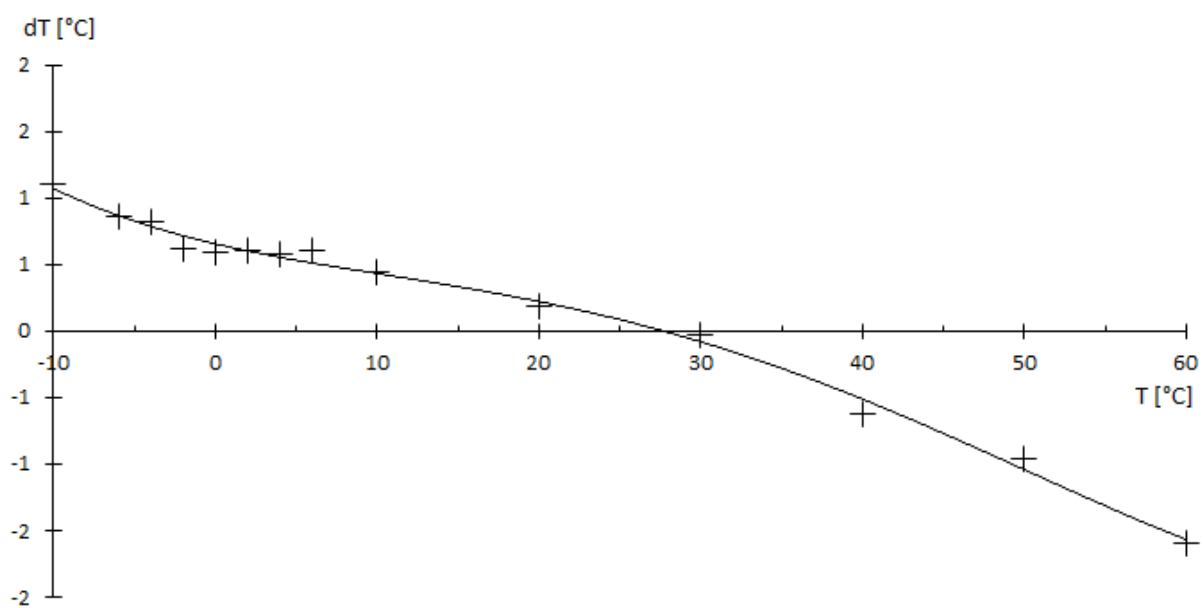
$T_{AOIP}$  [°C] - teplota změřená kalibrační pecí;  $T_{hot}$  [°C] - teplota naměřená na P0K050;  $T_{cool}$  [°C] - teplota naměřená na P1K0;  $T_{ref}$  [°C] - teplota naměřená na snímači KTG2 (ve zbytku měření referenční užívány jako referenční)

Z Tab. 5 vyplývá, že mají buďto všechny snímače nižší koeficient změny odporu na teplotě  $\alpha$ , nebo dochází k ohřevu snímačů při teplotách pece pod teplotou okolí a k ochlazování snímačů při teplotách pece nad teplotou okolí. Pokud se vynesou do grafu závislost rozdílu teploty pece  $T_{AOIP}$  a teplot snímačů, vyjde závislost s nulovou chybou přibližně na teplotě okolí (Obr. 5 a Obr. 6). Z toho lze usoudit, že naměřená chyba snímačů vzniká především přestupem tepla do kalibrační pece. Tato odchylka teploty je větší u snímače KTG2, který má výrazně tlustší přívodní kabel a je pevně spojen s izolací tohoto kabelu.

Kalibrace snímačů pomocí kalibrační pece tedy nevedla k požadovanému výsledku. Jediné, dle čeho je možné snímače kalibrovat, je tedy měření parametru A, kdy lze odhadnout, že při příkonu snímačů jdoucím k nule by se naměřené teploty měli sobě blížit a zároveň shodovat s teplotou okolí. Koeficienty snímačů  $\alpha$  a  $\beta$  jsou vzaty z normy, chyba nominálního odporu snímače (při 0°C) je dopočtena tak, aby seděla s měřením parametru A.



**Obr. 8: Rozdíl teploty naměřené snímačem KTG2 vůči teplotě kalibrační pece**



**Obr. 9: Rozdíl teploty naměřené snímačem P1K0 vůči teplotě kalibrační pece**

### 3.4. Časové konstanty snímačů

Odporový snímač teploty se při skokové změně teploty, nebo skokové změně chlazení chová jako statický člen 1. řádu (setrvačný článek). Časová konstanta tohoto článku je závislá na celkové tepelné kapacitě snímače a tepelné vodivosti snímače i tepelné vodivosti jeho okolí. Významnou roli hraje proudění v okolí snímače, které působí rychlejší výměnu tepla mezi snímačem a okolím.

Referenční snímač KTG2 ( $T_{\text{hot}}$ ) i snímač P1K0 ( $T_{\text{cool}}$ ) pracují s velmi malými výkony, žádná změna odporu snímače na skokovou změnu proudu vody nebyla naměřena. Vliv samoohřevu snímačů je zde zřejmě minimální. Dále bude tedy dynamika zkoumána pouze u snímače P0K050 ( $T_{\text{hot}}$ ). Proud snímačem je proudovým omezením zdroje nastaven na 100 mA, změnou průtoku vody snímačem dojde ke změně teploty snímače, teplota se následně ustálí na nové hodnotě. Měřenou změněnou veličinou je napětí na snímači.

Časová konstanta se vypočte jako doba, za kterou proběhla změna napětí o 63,2%, počítáno od času zahájení přechodného děje. Přechodný děj lze zobrazit na osciloskopu.

K měření byl využit osciloskop SIGLENT SDS 1102X+.

V tabulce 6 a 7 jsou naměřená data z těchto provedených experimentů:

Tab. 6: Elektricky ovládaným relé ventilem byl nastaven určitý průtok, po ustálení teploty snímače byl průtok zastaven ručním ventilem. Osciloskop v módu Single zaznamenal přechodový děj. Po opětovném ustálení teploty na snímači se spočetl rozdíl napětí a z něj napětí, pro které má být z osciloskopu odečtena časová konstanta.

Tab. 7: V tomto experimentu zůstává téměř vše stejné, jako v experimentu předchozím, pouze se ruční ventil z uzavřeného stavu otevřel. Měření probíhala souběžně pro stejné nastavení elektricky ovládaného ventilu.

Podmínky v laboratoři:

Teplota: 25,4-25,6 °C

Tlak: 99,10 kPa

Vlhkost: 37%

Měření provedeno dne 6. 9. 2019.

**Tab. 6: Doba odezvy na změnu průtoku snímače POK050 - zavření kohoutu**

$I_{jmen.}$ [mA]	$Q_{max}$ [kg/h]	$U_{Qmax}$ [V]	$I_{Qmax}$ [mA]	$Q_{min}$ [kg/h]	$U_{Qmin}$ [V]	$I_{Qmin}$ [mA]	$U_{dT}$ [V]	$dT$ [s]
100	193,0	5,958	100,40	0,0	7,230	100,28	0,804	7,0
100	148,9	5,977	100,40	0,0	7,229	100,28	0,791	7,0
100	94,3	6,035	100,42	0,0	7,250	100,30	0,768	7,5
100	48,6	6,083	100,40	0,0	7,257	100,30	0,742	8,5
100	15,6	6,173	100,45	0,0	7,267	100,33	0,691	10,0

$I_{jmen.}$  [mA] - jmenovitý proud nastavený zdrojem;

$Q_{max}$  [kg/h],  $U_{Qmax}$  [V],  $I_{Qmax}$  [mA] - průtok, napětí a proud při otevřeném kohoutu;

$Q_{min}$  [kg/h],  $U_{Qmin}$  [V],  $I_{Qmin}$  [mA] - průtok, napětí a proud při zavřeném, nebo částečně zavřeném kohoutu;

$U_{dT}$  [V] - hodnota změny napětí při přechodovém ději o 63,2%;

$dT$  [s] - časová konstanta odečtená z osciloskopu

**Tab. 7: Doba odezvy na změnu průtoku snímače POK050 - otevření kohoutu**

$I_{jmen.}$ [mA]	$Q_{max}$ [kg/h]	$U_{Qmax}$ [V]	$I_{Qmax}$ [mA]	$Q_{min}$ [kg/h]	$U_{Qmin}$ [V]	$I_{Qmin}$ [mA]	$U_{dT}$ [V]	$dT$ [s]
100	0,0	7,237	100,28	193,9	5,958	100,41	0,808	0,152
100	0,0	7,241	100,30	149,1	5,983	100,40	0,795	0,228
100	0,0	7,250	100,30	94,4	6,041	100,42	0,764	0,144
100	0,0	7,261	100,30	48,4	6,106	100,43	0,730	0,136
100	0,0	7,267	100,32	15,2	6,196	100,42	0,677	0,136

Význam symbolů je stejný jako u Tab. 6.

Jak je vidět porovnáním Tab. 6 a Tab. 7, čas potřebný pro ochlazení snímače je výrazně kratší, než čas potřebný pro jeho vyhřátí. Snímač tedy velmi rychle reaguje na zvýšení průtoku, při poklesu průtoku reaguje o dost pomaleji.

Jako další experiment bylo provedeno měření časové konstanty pro skok z nenulového průtoku na plný. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 8. Pokus o skok z plného na nenulový průtok se ukázal být náročný. Ručním ventilem se nepodařilo skokově nastavit chtěné průtoky. Od tohoto experimentu bylo upuštěno.

**Tab. 8: Doba odezvy na změnu průtoku snímače POK050 - z nenulového na plný**

I <sub>jmen.</sub> [mA]	Q <sub>max</sub> [kg/h]	U <sub>Qmax</sub> [V]	I <sub>Qmax</sub> [mA]	Q <sub>min</sub> [kg/h]	U <sub>Qmin</sub> [V]	I <sub>Qmin</sub> [mA]	U <sub>dT</sub> [V]	dT [s]
100	94,7	6,065	100,42	192,4	5,986	100,42	0,050	0,29
100	61,4	6,097	100,41	192,0	5,989	100,44	0,068	0,32
100	37,8	6,135	100,39	192,0	5,992	100,42	0,090	0,40
100	18,3	6,222	100,42	189,3	5,998	100,42	0,141	0,44

Význam symbolů je stejný jako u Tab. 6.

Dále proběhl pokus o změření odezvy na jednotkový skok proudu. Celé měření používaný zdroj GEINSTEK GPD-3303S nebyl shledán vhodným, při jednotkovém skoku proudu probíhá na samotném zdroji složitý přechodový děj. Využit byl zdroj Agilent E631A, u něj byl ovšem naměřen delší náběh a od dalšího měření bylo z časových důvodů prozatím upuštěno.

Závěr: Časy přechodného děje se u snímače POK05 pohybují při ohřevu okolo 8 sekund a při chladnutí okolo 0,2 sekundy. Výsledky předchozích měření tedy nejsou zatíženy chybou způsobenou dlouhým ustalováním teploty, protože bylo vždy čekáno na ustálení v řádu minut. Zároveň jsou všechny naměřené časy dost dlouhé na to, aby řízení vytápění senzoru a snímání na něm mohlo být realizováno např. pomocí PWM modulace na běžně dostupných microcontrolerech.

### 3.5. Opětovné měření A a B pro upravené podmínky

V kapitole 3.2 byl měřen parametr B termoanemometrického snímače, aproximace mocninnou funkcí však nebyla dost přesná. Na konci kapitoly byly nastíněny možné vlivy ovlivňující měření, jmenovitě:

- proudění vzduchu okolo snímačů - snímač byl zaizolován keramickou vatou
- možná změna proudění v trubičce snímače z laminárního na turbulentní - bude předmětem kapitoly 3.7
- ne dost přesné udržování konstantního rozdílu teplot - vzhledem k přesnosti měřících přístrojů není možné udržet rozdíly teplot s větší přesností, než zhruba  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , snaha tedy je neopustit tuto toleranci
- další vlivy nebyly zjištěny

Tyto vlivy jsou tedy v dalším měření brány v potaz a je snaha je odstranit.

Měření parametru A se provedlo shodně s kapitolou 3.1, snímač je tepelně izolovaný pro eliminaci proudění vzduchu a rychlých změn teploty v průběhu měření.

Podmínky v laboratoři:

Teplota: 25,4 až 26,2 °C      Tlak: 99,02 kPa      Vlhkost: 42%

Měření provedeno dne 9. 9. 2019.

**Tab. 9: Měření parametru A na snímači P0K050, izolovaný snímač**

P0K050 - hot		spočteno:		
U [V]	I [mA]	R [Ohm]	T <sub>hot</sub> [°C]	P [W]
0,0288	0,5263	54,72	24,24	0,015
0,0562	1,0270	54,72	24,25	0,058
0,1095	2,0008	54,73	24,28	0,219
0,2792	5,0971	54,78	24,53	1,423
0,5570	10,1400	54,93	25,33	5,648
1,1125	20,0300	55,54	28,50	22,283
1,6881	29,8667	56,52	33,58	50,418
2,9590	49,798	59,42	48,63	147,352
4,4565	69,972	63,69	70,79	311,830
6,3185	90,683	69,68	101,86	572,981
8,5896	110,432	77,78	143,92	948,561

Na rezistorech R<sub>cool</sub> (P1K0) a R<sub>ref</sub> (KTG2) byl držen konstantní příkon, vzhledem k tomu, že nebyl stanoven vliv samoohřevu, bylo napájecí napětí u R<sub>cool</sub> sníženo z 0,49 V na 0,20 V, proud snímačem se tím snížil, pohyboval se okolo 0,18 A. Kompletní tabulky jsou umístěny v souboru s daty (Excel - P1K0\_P0K050-druhy\_snimac.xlsx)

Pro získání parametru A byla sestavena závislost příkonu R<sub>hot</sub> na rozdílu teplot ze vztahu (r. 14), opět využijeme tvar z (r. 18):

$$A = A_1 \cdot \Delta T + A_0 = A_0 \left( \frac{A_1}{A_0} \cdot \Delta T + 1 \right) = A_0 (A_\alpha \cdot \Delta T + 1)$$

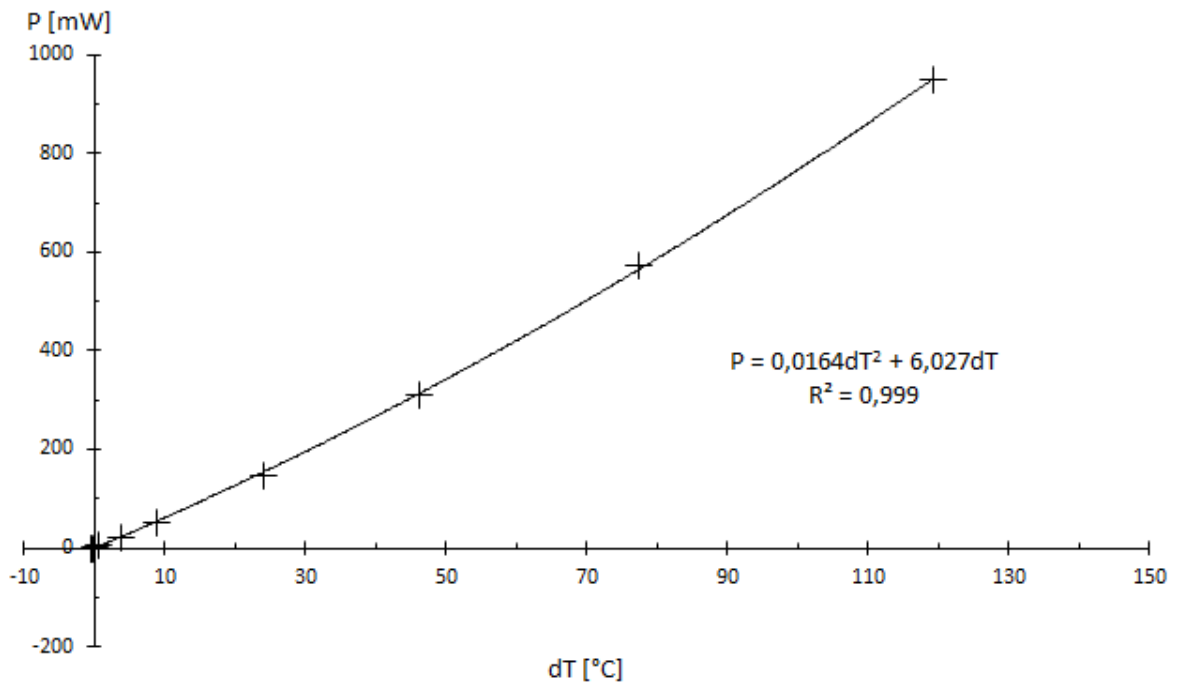
Odtud:

$$A_1 = 1,64 \cdot 10^{-5} \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-2}]$$

$$A_0 = 6,027 \cdot 10^{-3} \quad [\text{W} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{z toho dosazením: } A_\alpha = \frac{A_1}{A_0} = \frac{1,64 \cdot 10^{-5}}{6,027 \cdot 10^{-3}} = 0,002721 \quad [\text{K}^{-1}]$$

Z hodnot naměřených parametrů je jasně vidět, že zatímco koeficient lineárních tepelných ztrát zůstal nezměněn, kvadratický člen se zmenšil na méně než polovinu. Příčina tohoto chování bude předmětem kapitoly 4.



**Obr. 10: Parametr A čidla P0K050 vypočtený pomocí referenčního měřidla pro izolované čidlo**

Parametr B byl znovu měřen jen pro jeden rozdíl teplot, aby byl ověřen nebo vyvrácen vliv izolace na parametr B. Měření proběhlo pro  $dT = 51,4^\circ\text{C}$ . Dále nebylo měřeno se dvěma referenčními průtokoměry, ale na celý rozsah byl použit jeden průtokoměr MASS2100 s maximálním průtokem 1000 kg/h. Dosavadní nepřesnosti v měření jsou větší, než možná chyba způsobená tímto přístrojem (viz. Obr. 3). Jak plyne z Tab. 10, při měřených průtocích nedochází k ovlivnění naměřené teploty na P1K0 ( $T_{\text{cool}}$ ) přestupem tepla z P0K050 ( $T_{\text{hot}}$ ). Parametr B tedy můžeme počítat rovnou z teploty  $T_{\text{cool}}$ . Teplota  $T_{\text{ref}}$  bude dále měřena jen pro kontrolu, že k ovlivnění měření opravdu nedochází.



Podmínky v laboratoři:

Teplota: 22,5 až 23,8 °C      Tlak: 98,79 kPa      Vlhkost: 48%

Měření provedeno dne 10. 9. 2019.

**Tab. 10: Měření parametru B pro  $dT = 51,4^{\circ}\text{C}$ , izolovaný snímač**

Q [kg/s]	T <sub>ref</sub> [°C]	T <sub>cool</sub> [°C]	P [mW]	dT <sub>ref</sub> [°C]	dT [°C]	B [10 <sup>-3</sup> ]	B <sub>ref</sub> [10 <sup>-3</sup> ]
0,00569	24,03	24,19	942,8	51,60	51,44	13,590	13,519
0,00842	24,47	24,41	973,2	51,33	51,39	11,769	11,790
0,01111	24,15	24,11	997,9	51,38	51,42	10,646	10,660
0,01408	23,48	23,44	1014,6	51,40	51,44	9,704	9,717
0,01672	23,37	23,25	1027,6	51,24	51,36	9,105	9,138
0,01972	23,36	23,23	1035,3	51,10	51,24	8,512	8,548
0,02242	23,16	23,15	1050,1	51,34	51,35	8,130	8,133
0,02511	23,16	23,07	1058,2	51,29	51,38	7,765	7,786
0,02800	23,27	23,23	1070,2	51,30	51,34	7,484	7,495
0,03183	23,36	23,30	1095,4	51,25	51,31	7,270	7,284
0,03608	23,37	23,29	1120,8	51,25	51,34	7,057	7,074
0,04044	23,38	23,25	1154,9	51,28	51,41	6,946	6,972
0,04475	23,37	23,25	1176,0	51,27	51,39	6,780	6,803
0,04872	23,38	23,33	1197,1	51,29	51,34	6,673	6,683
0,05297	23,50	23,33	1213,1	51,20	51,37	6,515	6,546

Q [kg/s] - průtok referenčním průtokoměrem,

T<sub>ref</sub> [°C] - teplota měřená referenčním snímačem,

T<sub>cool</sub> [°C] - teplota měřená snímačem P1K0,

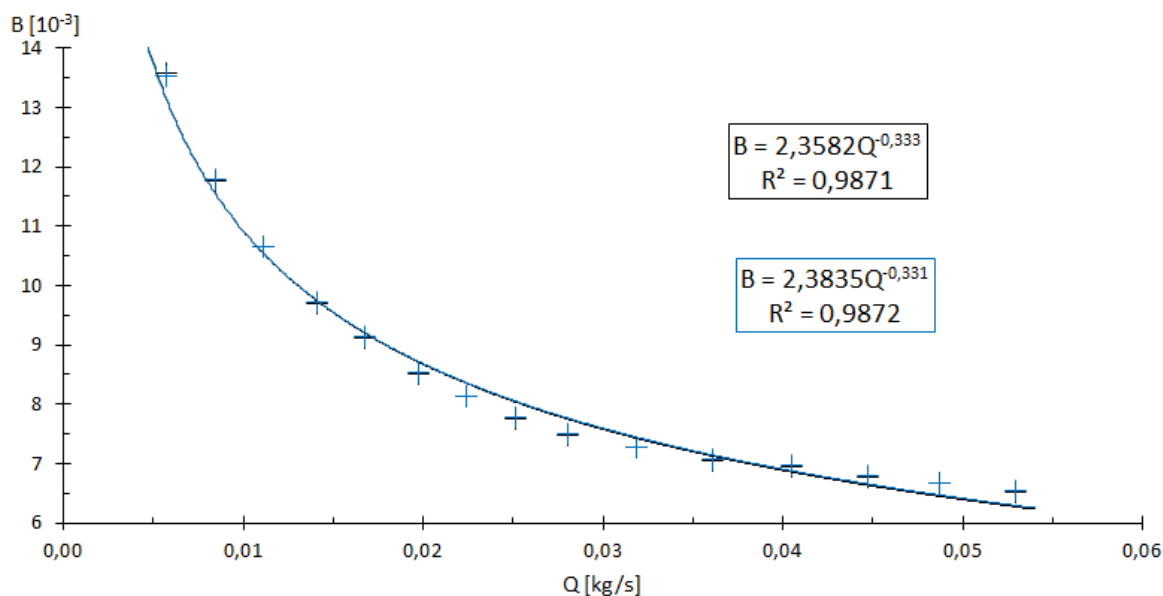
P [mW] - výkon potřebný pro udržení konstantního rozdílu teplot,

dT<sub>ref</sub> [°C] - rozdíl teplot vyhřívaného snímače a snímače referenčního,

dT [°C] - rozdíl teplot vyhřívaného snímače a snímače P1K0,

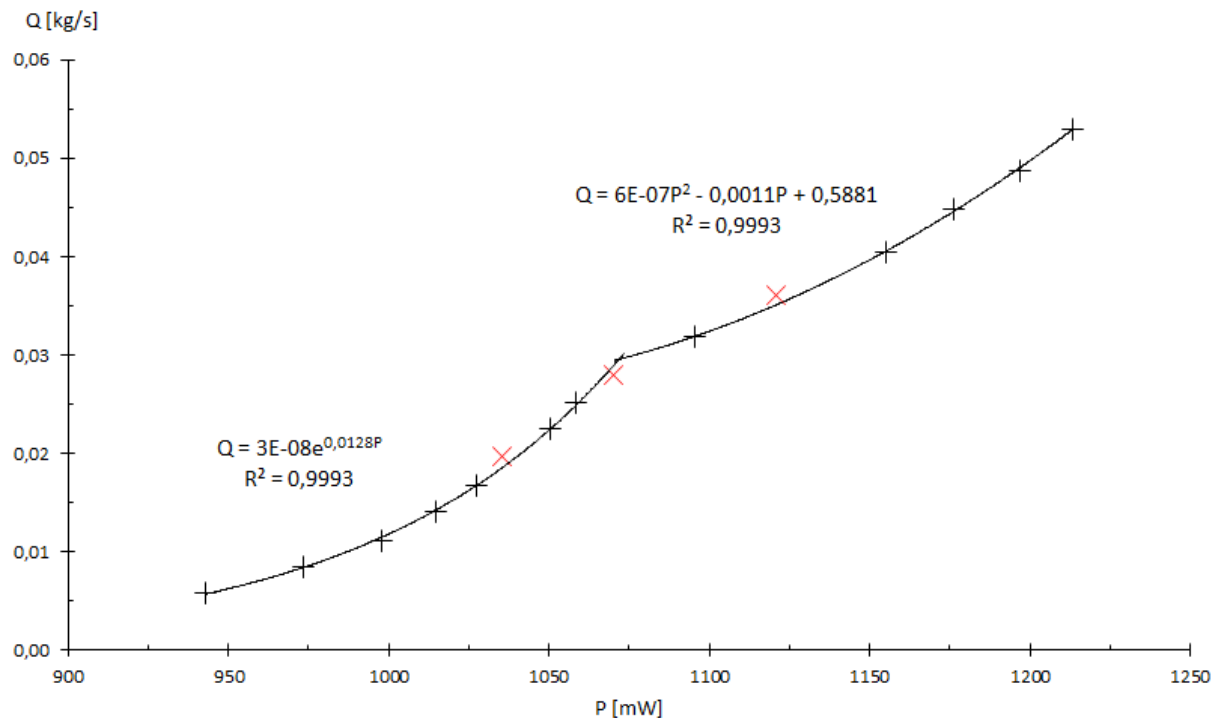
B [mW·K<sup>-1</sup>s<sup>1/2</sup>m<sup>-1/2</sup>] - vypočtený parametr B pomocí dT,

B<sub>ref</sub> [mW·K<sup>-1</sup>s<sup>1/2</sup>m<sup>-1/2</sup>] - vypočtený parametr B pomocí dT<sub>ref</sub>,



**Obr. 11: Parametr B v závislosti na průtoku pro izolovaný snímač**

Závislosti na Obr. 11 ukazují závislost nově změřeného parametru  $B$  na velikosti průtoku. Černě je označen parametr  $B$  vypočtený z P1K0 ( $T_{\text{cool}}$ ) a modře parametr  $B_{\text{ref}}$  vypočtený z hodnot referenčního snímače. Ze závislostí je patrné, že měření není nijak ovlivněno přestupem tepla mezi snímači, hodnoty  $B$  a  $B_{\text{ref}}$  se v podstatě plně překrývají. Dále je ze závislosti patrné, že se po zpřesnění měření a odfiltrování možných nežádoucích vlivů aproximace mocninou funkcí nezpřesnila. Naopak se ukazuje, že měřené odchylky nejsou náhodné, ale vykazují určitý trend.



**Obr. 12: Potřebný příkon pro  $dT = 51,4^\circ\text{C}$  v závislosti na velikosti průtoku, izolovaný snímač**

Na Obr. 12 je znázorněn pokus aproximovat naměřené hodnoty dvěma funkcemi. Původní aproximace velmi dobře sedí na první polovinu průběhu, od průtoku zhruba 0,03 kg/s se láme a dále se řídí jinou funkcí. Možným vysvětlením je změna proudění, žádné další možné vlivy nejsou prozatím známy.

### 3.6. Parametry A a B pro druhý snímač

Pro ověření, že chování popsané v kapitole 3.5 není chybou konkrétního kusu snímače, nebo se pozorovaný jev nemění pro různé snímače, byl původně zkoumaný snímač vyměněn za jiný snímač shodného typu P1K0/050.232.2K.C.050.M.U.S. U vyměněného snímače byly měřeny tytéž charakteristiky a přinesly tytéž výsledky, proto je zde zbytečné je znovu uvádět. Bylo tedy potvrzeno, že k zjištěným jevům nedochází pouze u jednoho konkrétního snímače. Všechna naměřená data i vynesené závislosti jsou v příloze 10.1 „P1K0\_P0K050-druhy\_snimac.xlsx“.

### 3.7. Tlakové ztráty a Reynoldsovo číslo

V předchozích měřeních byla několikrát zmíněna hypotéza, podle které za změnu chování parametrů může změna proudění z laminárního na turbulentní. Tato

změna by se měla projevit na tlakové ztrátě, proto je třeba změřit tlakové ztráty na několika potrubích a výsledky porovnat s teoretickým přechodem na turbulentní proudění vypočteným z Reynoldsova čísla.

Tlaková ztráta byla měřena diferenčním tlakovým snímačem FOXBORO BIA408 s nastaveným rozsahem 0 až 64 kPa. Snímač je připojen v prvním bodě před rozdělením potrubí k jednotlivým snímačům a v druhém bodě po opětovném spojení vedení. Do měřené tlakové ztráty tedy musíme počítat i ztráty na vedení k jednotlivým snímačům.

Snímač FOXBORO BIA408 má jako výstup proudovou smyčku 4 až 20 mA. Za nulového průtoku byl naměřen proud  $I_0 = 3,991$  mA, při této hodnotě elektrického proudu je počítáno s nulovou tlakovou ztrátou.

Podmínky v laboratoři:

Teplota: 26,3°C      Tlak: 98,65 kPa      Vlhkost: 43,5%      Teplota vody: 24,52°C

Teplota vody byla měřena pomocí teploměru ve snímači MASS2100.

Měření provedeno dne 14. 10. 2019.

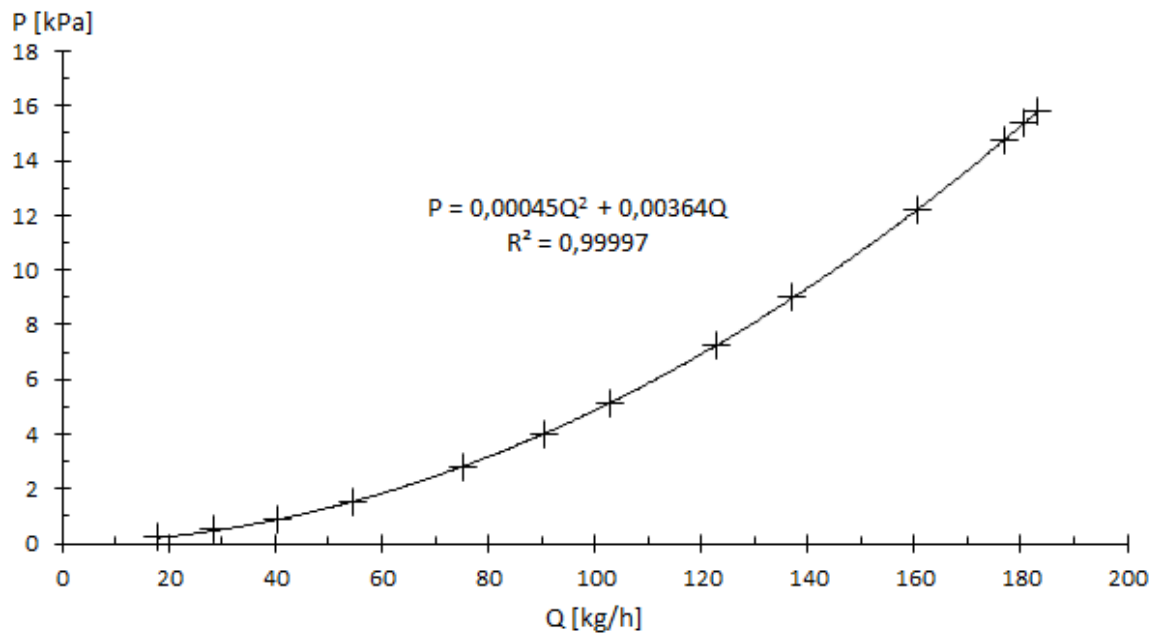
**Tab. 11: Tlakové ztráty v závislosti na průtoku**

Trubička snímače P1K0/050			Trubka pro ultrazvuk FUJI FSSA		
$Q_{ref}$ [kg/h]	I [mA]	P [kPa]	$Q_{ref}$ [kg/h]	I [mA]	P [Pa]
18,0	4,021	0,258	19,5	3,960	4,92
28,4	4,085	0,511	28,7	3,961	8,28
40,2	4,179	0,889	41,6	3,965	25,12
54,7	4,340	1,531	56,2	3,972	54,40
75,2	4,655	2,793	80,5	3,987	114,64
90,4	4,955	3,992	93,4	3,998	158,88
103,0	5,240	5,132	110,3	4,012	215,08
122,9	5,770	7,252	134,2	4,040	324,20
136,8	6,207	9,001	150,8	4,062	413,12
160,7	7,013	12,223	188,8	4,119	640,28
176,8	7,644	14,748	219,0	4,177	874,68
180,7	7,800	15,370	228,2	4,196	950,52
183,2	7,904	15,789	232,3	4,205	984,32

$Q_{ref}$  [kg/h] je referenční průtok měřený pomocí MASS2100;

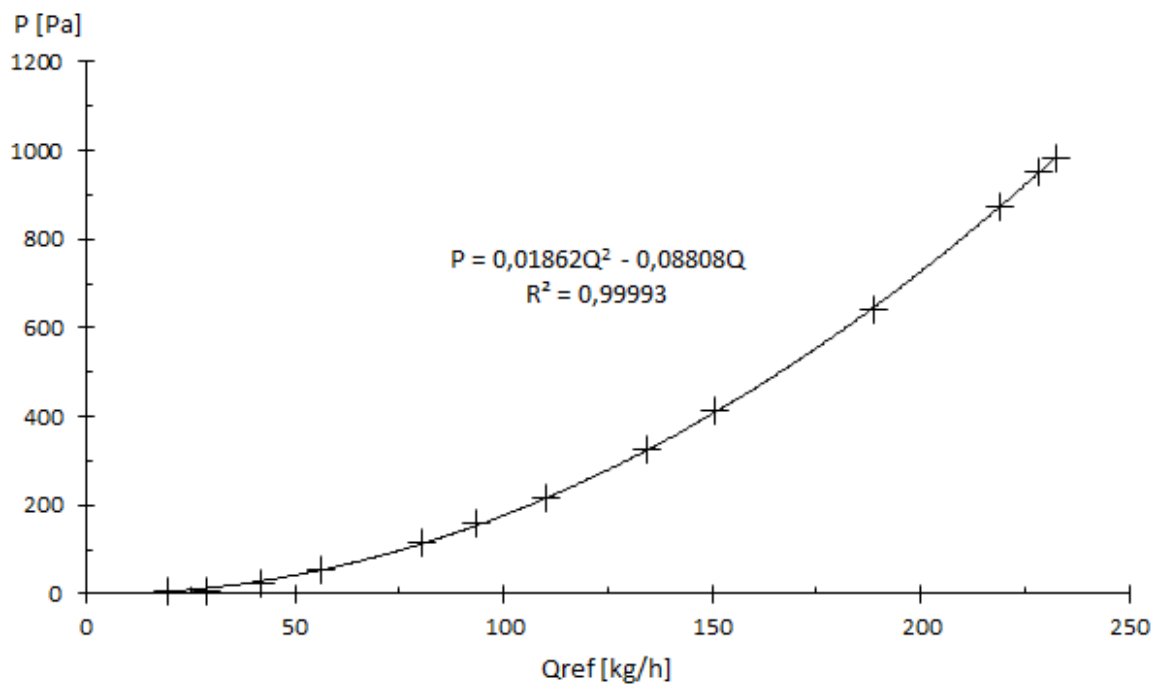
I [mA] je proud měřený na proudové smyčce snímače FOXBORO;

P [kPa] nebo [Pa] je vypočtená tlaková ztráta



**Obr. 13: Tlakové ztráty na trubičce snímače P1K0/050 v závislosti na velikosti průtoku**

Z Obr. 13 je vidět, že tlakové ztráty rostou v celém měřeném rozsahu kvadraticky, jedná se tedy o turbulentní proudění.



**Obr. 14: Tlakové ztráty na trubce snímače FUJI v závislosti na velikosti průtoku**

Navzdory předpokladu byl kvadratický průběh naměřen i u výrazně tlustší trubky určené pro ultrazvukový snímač FUJI FSSA. Rychlost v této trubce však není dostatečná pro vznik turbulentního proudění. Aby bylo toto ověřeno, byla sestavena tabulka s výpočty Reynoldsova čísla pro dva průřezy potrubí odpovídající průřezům jednotlivých snímačů.

**Tab. 12: Výpočet Reynoldsova čísla pro trubičku snímače P1K0/050**

$Q_m$ [kg/h]	$Q_m$ [kg/s]	$v$ [m/s]	Re [-]	Druh proudění:
0	0,0000	0,0000	0	laminární proudění
5	0,0014	0,1745	620	
10	0,0028	0,3490	1241	
15	0,0042	0,5235	1861	
20	0,0056	0,6979	2482	přechodné období
30	0,0083	1,0469	3722	
40	0,0111	1,3959	4963	turbulentní proudění
50	0,0139	1,7448	6204	
60	0,0167	2,0938	7445	
70	0,0194	2,4428	8685	
80	0,0222	2,7917	9926	
90	0,0250	3,1407	11167	
100	0,0278	3,4897	12408	

$Q_m$  [kg/h] nebo [kg/s] je hmotnostní průtok, pro který bude počítáno Reynoldsovo číslo;

$v$  [m/s] je vypočtená střední rychlost vody v potrubí;

Re [-] je Reynoldsovo číslo

**Tab. 13: Výpočet Reynoldsova čísla pro trubku snímače FUJI**

$Q_m$ [kg/h]	$Q_m$ [kg/s]	$v$ [m/s]	Re [-]	Druh proudění:
0	0,0000	0,0000	0	laminární proudění
10	0,0028	0,0042	136	
20	0,0056	0,0085	272	
40	0,0111	0,0169	545	
60	0,0167	0,0254	817	
80	0,0222	0,0338	1090	

100	0,0278	0,0423	1362	
120	0,0333	0,0507	1634	
140	0,0389	0,0592	1907	
160	0,0444	0,0676	2179	
180	0,0500	0,0761	2451	přechodné období
200	0,0556	0,0845	2724	
250	0,0694	0,1057	3405	
300	0,0833	0,1268	4086	
350	0,0972	0,1479	4767	turbulentní proudění
400	0,1111	0,1691	5448	
500	0,1389	0,2113	6809	
600	0,1667	0,2536	8171	
700	0,1944	0,2959	9533	
800	0,2222	0,3381	10895	

Význam symbolů je stejný jako v Tab. 12.

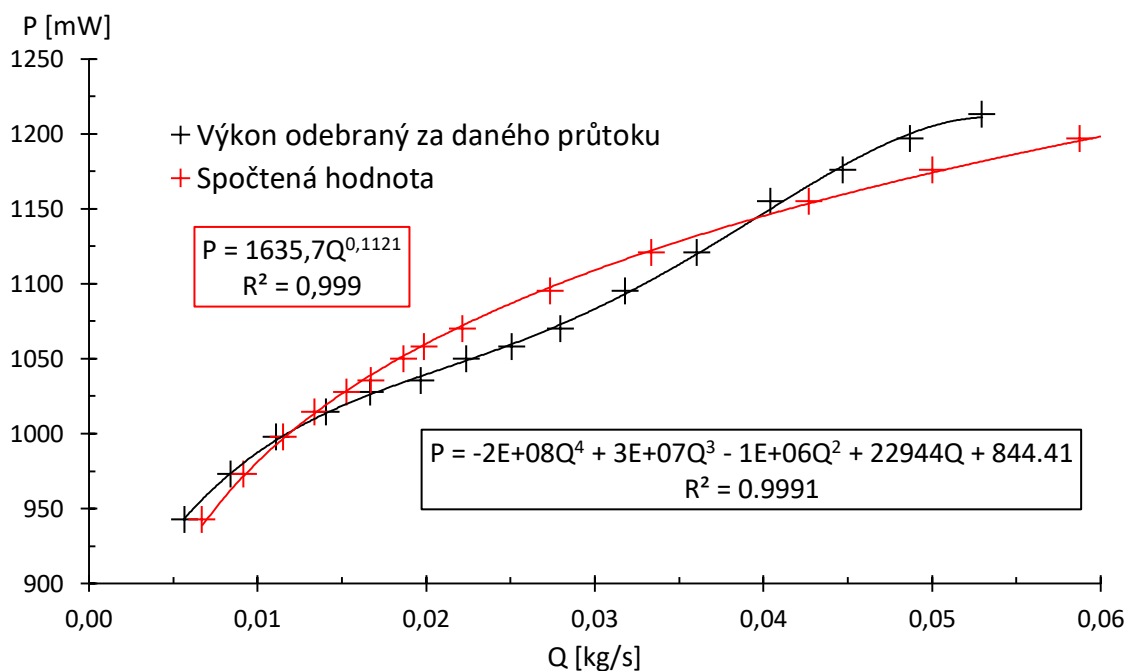
Reynoldsovo číslo bylo pro Tab. 12 počítáno dle (r. 1). Bylo počítáno s hustotou vody  $\rho = 995 \text{ kg/m}^3$ , průřez trubičky snímače je  $S = 8 \text{ mm}^2$ , plocha průřezu byla počítána jako plocha kruhu s úsečí. Předpokladem je, že v nekruhové nesymetrické trubičce dojde k přechodu na turbulentní proudění dříve, než u trubičky kruhového průřezu. Průměr byl tedy spočten jako průměr kruhové trubky o průřezu  $8 \text{ mm}^2$ ,  $D = 3,2 \text{ mm}$ . Výpočet je tedy pouze přibližný, bude však lépe odpovídat realitě, než kdybychom počítali se změřeným průměrem, který by vůbec nebral v potaz nesymetrické zúžení trubky. Kinematická viskozita vody je při pokojové teplotě přibližně  $\nu = 9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . [7]

Pro Tab. 13 platí stejné parametry vody jako pro Tab. 12, průměr trubky je  $D = 29 \text{ mm}$  a průřez  $S = 6,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

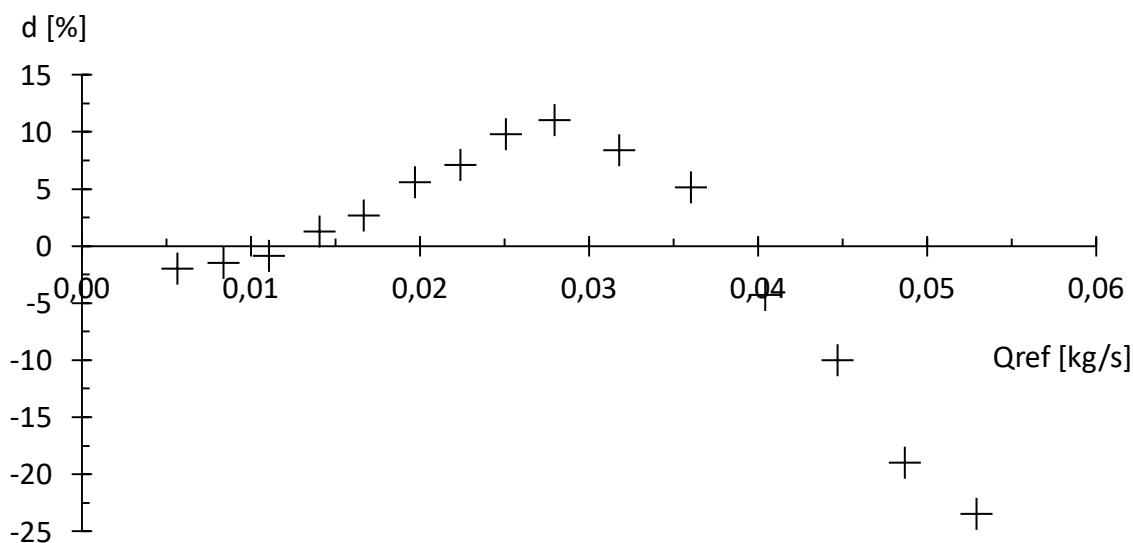
Ze srovnání výpočtů v Tab. 13 a měření v Tab. 11 vyplývá, že tlakové ztráty kvadratického charakteru musí vznikat jinde, než v počítaném úseku trubky. Vznikají tedy na aparatuře a je s nimi třeba počítat i u měření na snímači P1K0/050. Kdy skutečně dochází k přechodu na turbulentní proudění v trubičce snímače, tedy nebylo možné na dané aparatuře zjistit.

## 4. Vyhodnocení naměřených dat

Z naměřených závislostí byly odvozeny úpravy Kingovi rovnice, po dosazení měřených dat tedy bylo možné vypočítat průtoky a porovnat je s průtoky měřenými. Z důvodů již zmíněných nepřesností aproximace parametru B byly zjištěny značné chyby vypočtených průtoků.



**Obr. 15: Porovnání měřené základní charakteristiky (červená) s vypočtenou charakteristikou (černá), izolovaný snímač,  $dT = 51,4^\circ\text{C}$**



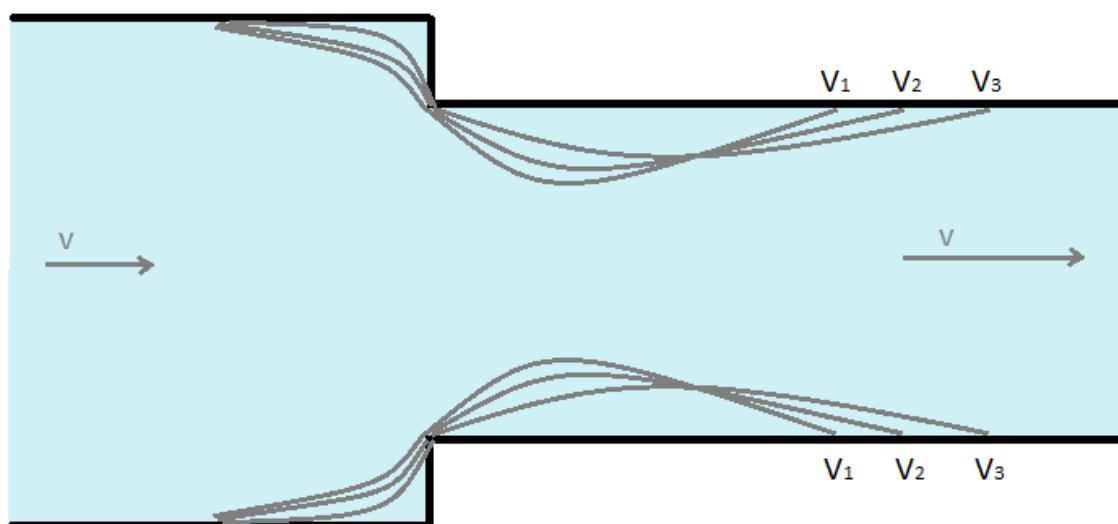
**Obr. 16: Velikost relativní chyby z rozsahu pro Obr. 15 a rozsah 0,005 až 0,053 kg/s**



Z vynesných závislostí a spočtených chyb plyne, že zvolený matematický model snímače neodpovídá měřené realitě. Naměřená závislost výkonu na průtoku mění na měřeném rozsahu svůj průběh a je tedy velmi těžko popsatelná. Proložení polynomem vyššího řádu by znamenalo praktické komplikace při kalibraci každého snímače, kdy by bylo nutné proměřit celou jeho charakteristiku pro stanovení koeficientů polynomu. Nebyla by také zachycena fyzikální podstata tohoto chování a tedy ani možná závislost na změny okolních podmínek.

Důvodem tohoto chování může být jev z Obr. 1, při němž vzniká víření okolo stěn za zúžením trubičky. Délka tohoto víření za zúžením by měla záviset na rychlosti proudění.

V následujícím obrázku je  $v_1 < v_2 < v_3$ .



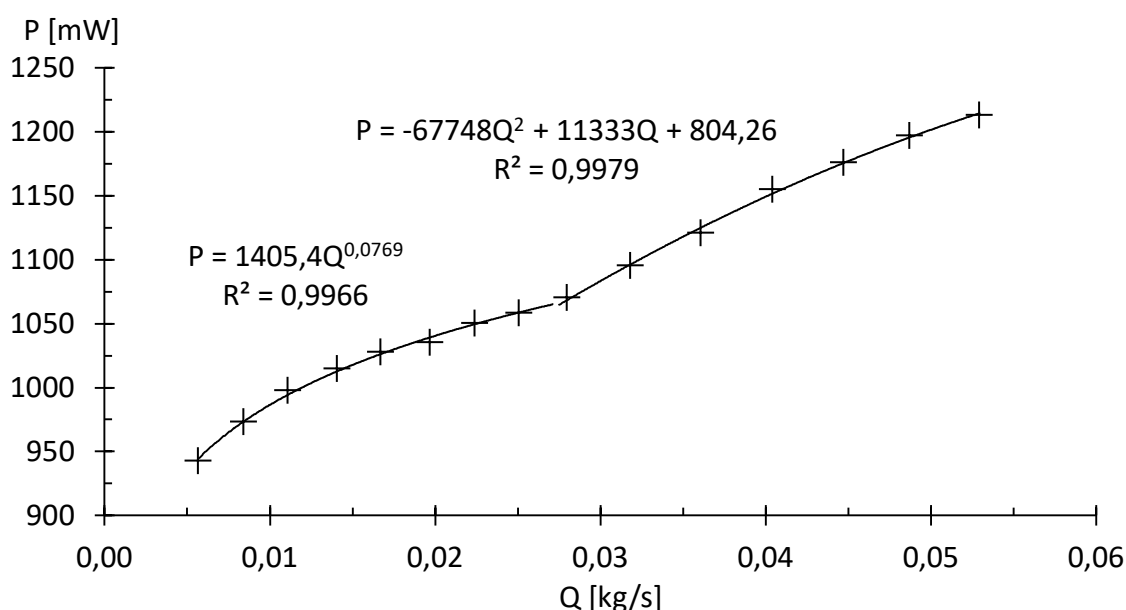
**Obr. 17: Dosah víření po redukci potrubí v závislosti na rychlosti proudění [5]**

Řešením tohoto problému může být buďto změna rozměrů samotného snímače, nebo rozdělení charakteristiky na dvě funkce: funkci před a po změně proudění okolo stěny snímače. Druhá varianta je značně problematická, snímač by měl velkou chybu v oblasti přechodu těchto dvou funkcí a není jisté, jak se bude tento přechod posouvat např. při změně přívodního potrubí, nebo jiném druhu šroubení na trubičce snímače. S teplotou se mění třecí síly ve vodě a tedy Reynoldsovo číslo i tvar a délka oblasti víření.

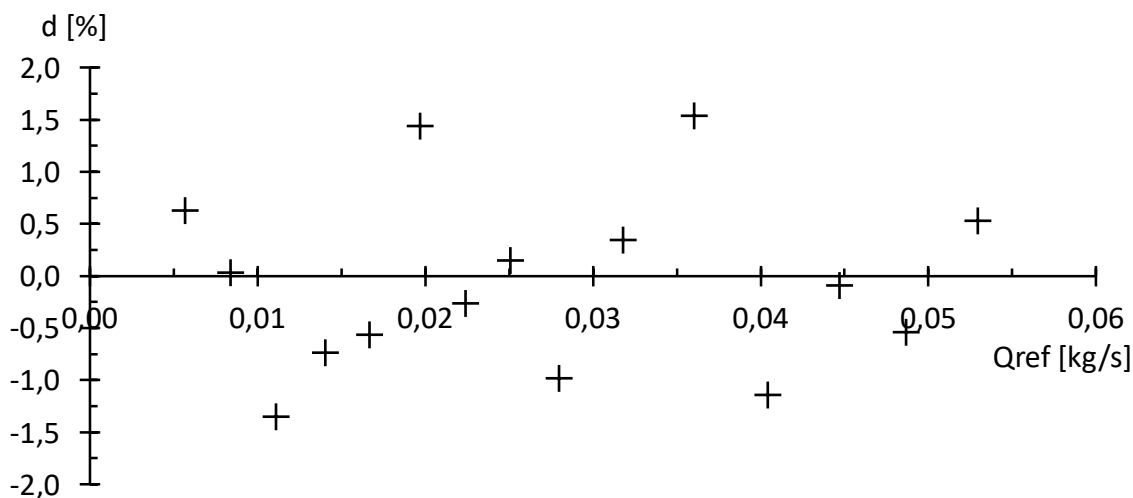
Pro realizaci snímače bude tedy nutné změnit jeho rozměry. Zvětšením průřezu se zmenší tlakové ztráty i deformace trubičky prolisem pro teplotní snímače (hloubka prolisu může zůstat stejná, jako je dosud, trubička se tedy bude více blížit ideálnímu kruhovému tvaru). Mohlo by také dojít k prodloužení trubičky. Tím by se zajistilo, že v místě měření bude tok ustálený.

#### 4.1. Rozdělení charakteristiky

Protože změnu rozměrů snímače není možné ihned provést, byla vyzkoušena již zmíněná varianta s rozdělením charakteristiky snímače na více navazujících funkcí. Je třeba dodat, že pro korektní provedení navázání těchto funkcí na sebe by bylo potřeba proměřit více bodů okolo místa zlomu. Celkově připadá po rozdělení charakteristiky málo bodů na každou z funkcí, výsledky rozdělení jsou proto jen přibližné. Zejména funkce, jimiž se prokládá druhá půlka rozsahu, nejsou příliš jasné. Charakteristika je v tomto bodě již dost plochá, je tedy možno ji proložit různými funkcemi, jako je polynom 2. řádu, nebo mocninná funkce.



Obr. 18: Rozdělení charakteristik na dvě funkce, izolovaná snímač,  $dT = 51,4^\circ\text{C}$



Obr. 19: Velikost relativní chyby z rozsahu pro Obr. 18, rozsah 0,005 až 0,053 kg/s

Chyba po rozdělení závislosti již nevykazuje žádný trend a jedná se zřejmě o nahodilou chybu. Přesnost takového snímače by byla 2,5% z rozsahu.

#### **4.2. Zhodnocení měření**

Snímač lze se současným modelem použít pro měření s chybou do 2% z rozsahu. Sledovaný rozsah je 0,005 až 0,053 kg/s. Hodnoty v rozsahu 0,005 až 0,025 kg/s odpovídají odvozenému vzorci pro výpočet průtoku. Pro zlepšení vlastností snímače by tedy bylo zapotřebí upravit rozměry tak, aby k tomuto zlomu nedocházelo a celý rozsah snímače byl popsitelný jednou funkcí. Lze předpokládat, že naměřený zlom charakteristiky nastává při určité rychlosti proudění (Obr. 17). Zvětšením průměru trubky snímače se docílí snížení rychlosti proudění, dá se ale větší „volnost“ víření, možná tedy bude nutné snímač i prodloužit, aby nastalo uklidnění toku. Pro lepší popis víření v širší, respektive delší, trubce bude nejvhodnější využít simulace.

## 5. Simulace v programu COMSOL

Program COMSOL Multiphysics (dále jen COMSOL) je univerzální simulační software na modelování zařízení a procesů pro technické, výrobní a vědecké výzkumy. V programu COMSOL lze kombinovat různé fyzikální modely a způsoby analýz pro řešení komplikovaných problémů, jako např. tepelné toky v elektrických obvodech, proudění kapalin a plynů, mechanické systémy, pnutí a mechanické deformace a další. V programu si lze vytvořit model 2D, nebo 3D model systému, nadefinovat vlastnosti materiálů a prostředí, nebo využít širokou knihovnu již nadefinovaných materiálů. Dále lze stanovovat počáteční a okrajové podmínky modelů a další nastavení pro přesné simulace zkoumaných dějů. V této práci bude využit modul pro proudění kapalin a modul pro přestup tepla v plynech, kapalinách a pevných látkách. [9]

### 5.1. Způsob modelování proudění v programu COMSOL

Pro simulaci proudění můžeme v programu COMSOL využít 3 různé fyzikální moduly, všechny počítají s hustotou a dynamickou viskozitou proudící tekutiny:

- 1) Laminar flow - vstupními a výstupními proměnnými jsou tlak a rychlost průtoku. Modul v tekutině simuluje tlakové a rychlostní pole.
- 2) Turbulent Flow, Low Re - vstupní a výstupní proměnné jsou stejné, modul ale krom tlakového pole a pole průtoku simuluje také pole kinetické energie, rozptyl proudění a vzdálenost od stěn (změny viskozity pro štěrby).
- 3) Turbulent Flow - je shodný s předchozím, ale nepočítá vzdálenosti od stěn.

Ve všech modulech lze simulovat stlačitelné i nestlačitelné proudění tekutin.

### 5.2. Časové a statické studie průtoku

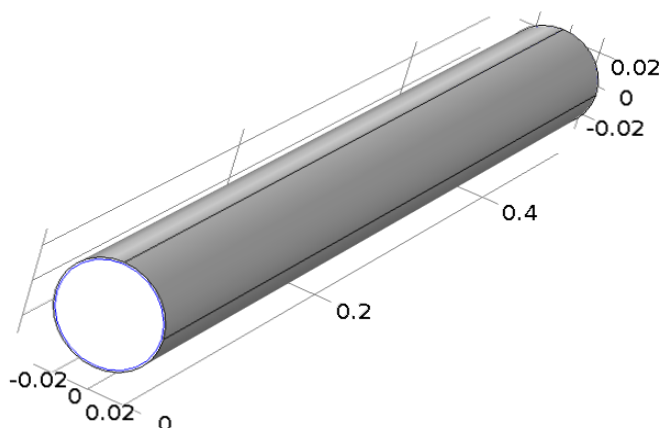
Pro sestavený model s přidávanými fyzikálními moduly lze spouštět základní dva typy studií:

- 1) Statickou studii (Study-stationary) - ta posuzuje stav systému po odeznění přechodného děje.
- 2) Časovou studii (Study-Time Dependent) - simuluje průběh dějů v čase, zaznamenává počáteční stav a od něj stavy v časech nastavených uživatelem. Tento způsob simulace se ukázal jako časově náročnější.

Pro simulaci toků v trubce lze využít oba druhy studií, ve zde odsimulovaných případech se výsledky obou studií neliší. Pro tepelné toky je v mém případě vhodnější použít časově závislou studii z důvodů nutnosti počítání tepelných toků přes plochy snímače.

### 5.3. Simulace v rovné trubce

Pro zjištění chování jednotlivých modulů bylo simulováno chování průtoku v rovném potrubí.



Parametry trubky

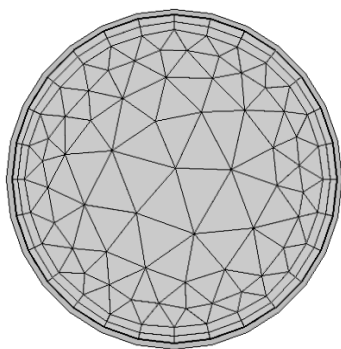
délka: 0,5 m

vnější průměr: 0,06 m

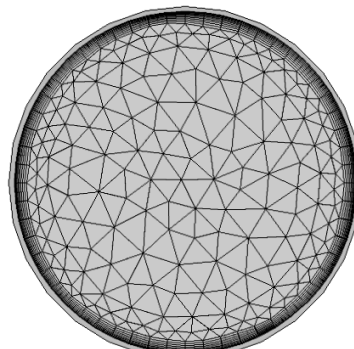
vnitřní průměr: 0,058m

**Obr. 20: Zkušební trubka**

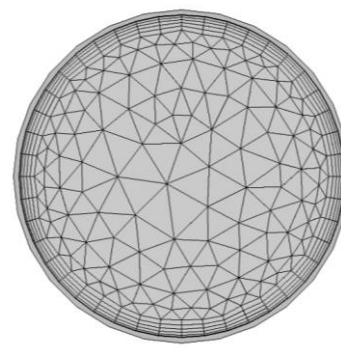
Pro různé moduly COMSOL vygeneruje při stejném nastavení různě husté “sítě prvků”. Pro ukázkou průřez trubkou pro různé moduly se stejným nastavením “Mesh - Element size: Coarser”:



Mesh pro Laminární modul



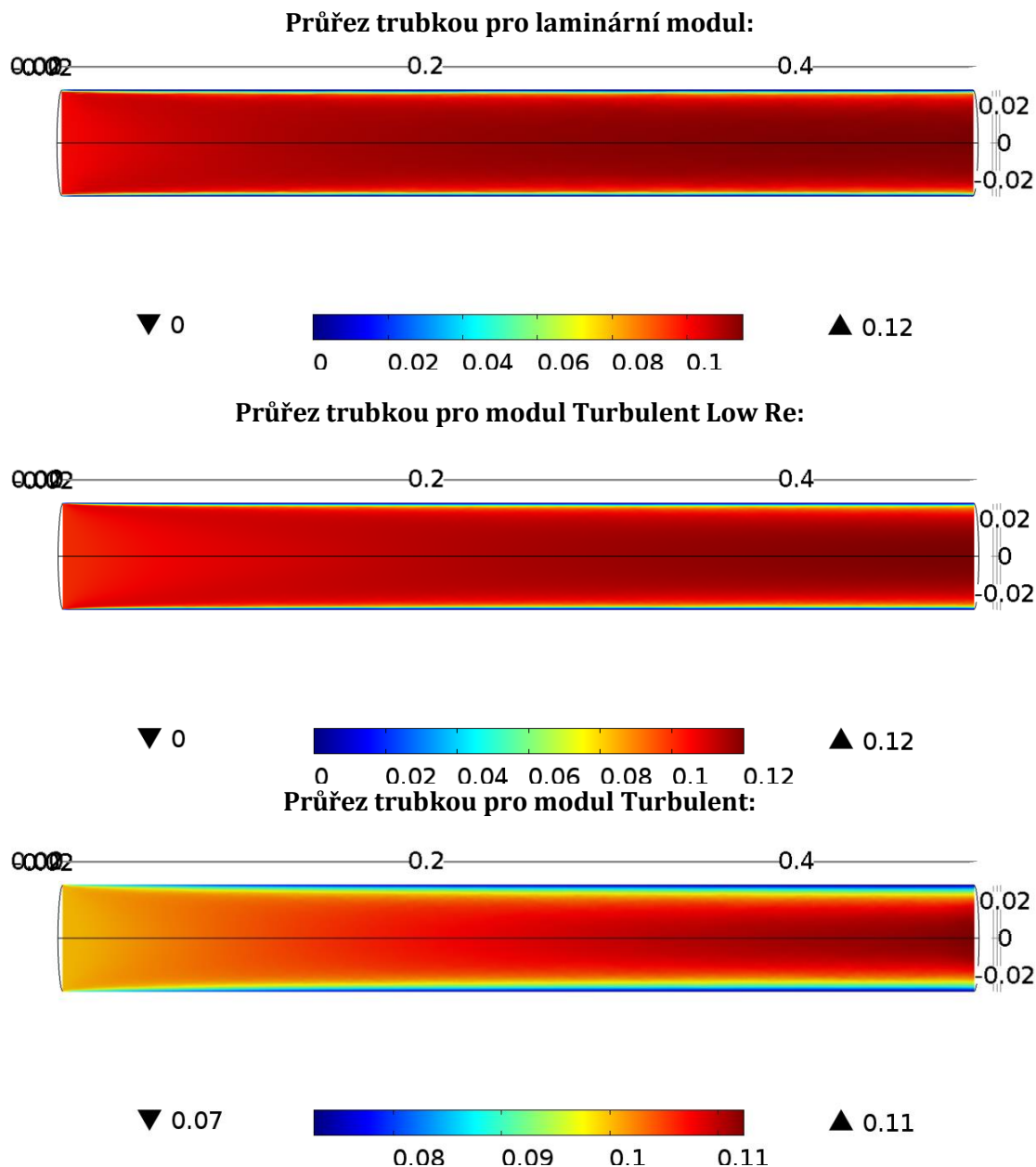
Mesh pro LowRe modul



Mesh pro Turbulentní modul

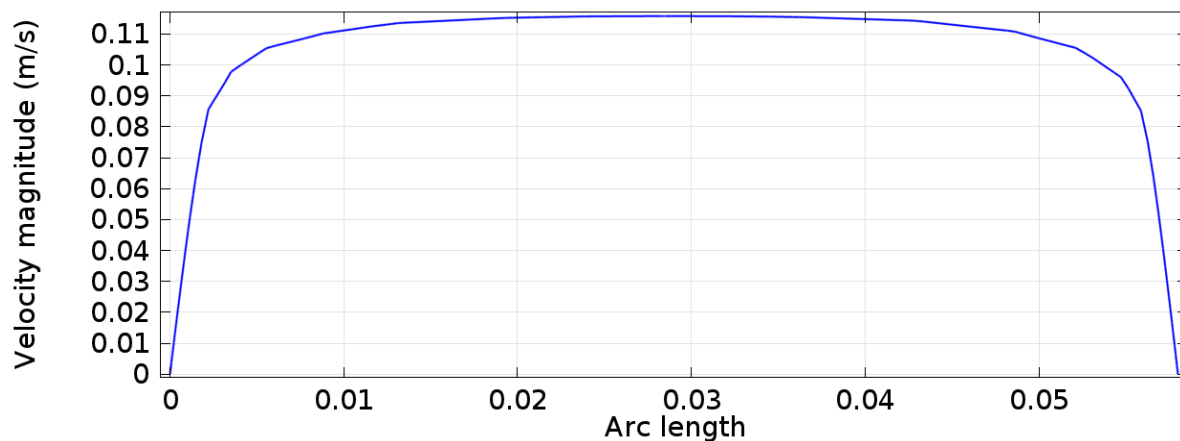
**Obr. 21: Ukázka průřezu modelem trubky rozdělené na jednotlivé prvky**

V trubce byly odsimulovány průběhy průtoku pro ustálený stav, tok je vždy zleva doprava:

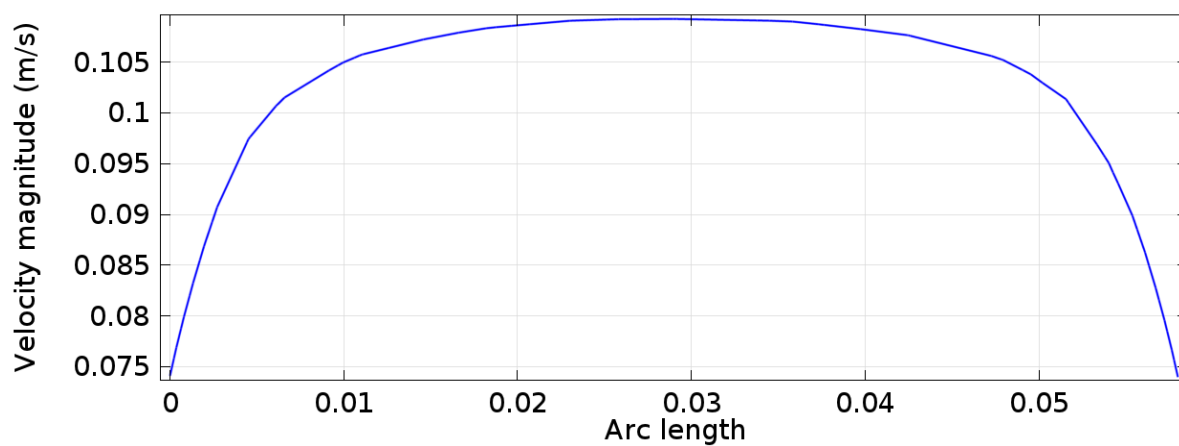


**Obr. 22: Průřezy trubkou pro různé moduly proudění,  $v = 0,1 \text{ m/s}$**

Už z prvního náhledu je patrné, že případné turbulentní jevy lze dobře simulovat jen pro poslední zmíněný modul. Pro lepší představu lze nechat vykreslit i profil proudění v potrubí. Teoretickým předpokladům zřejmě lépe vyhovuje modul pro turbulentní proudění.

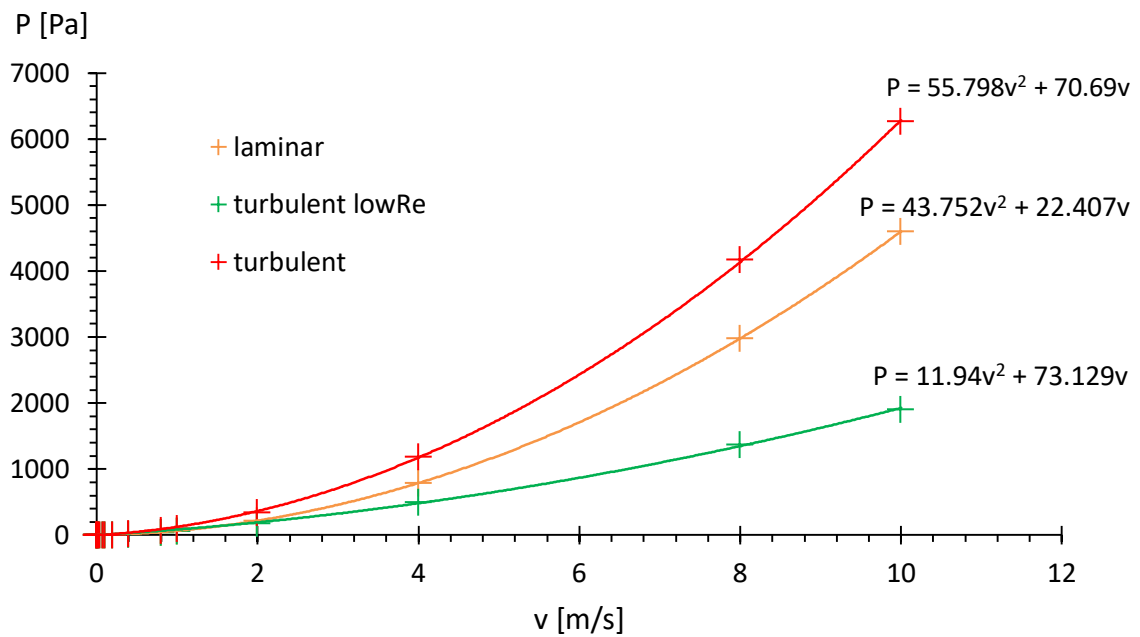


**Obr. 23: Průtokový profil pro modul Turbulent Low Re (shodný s laminárním modulem),  $v = 0,1$  m/s**



**Obr. 24: Průtokový profil pro modul Turbulent,  $v = 0,1$  m/s**

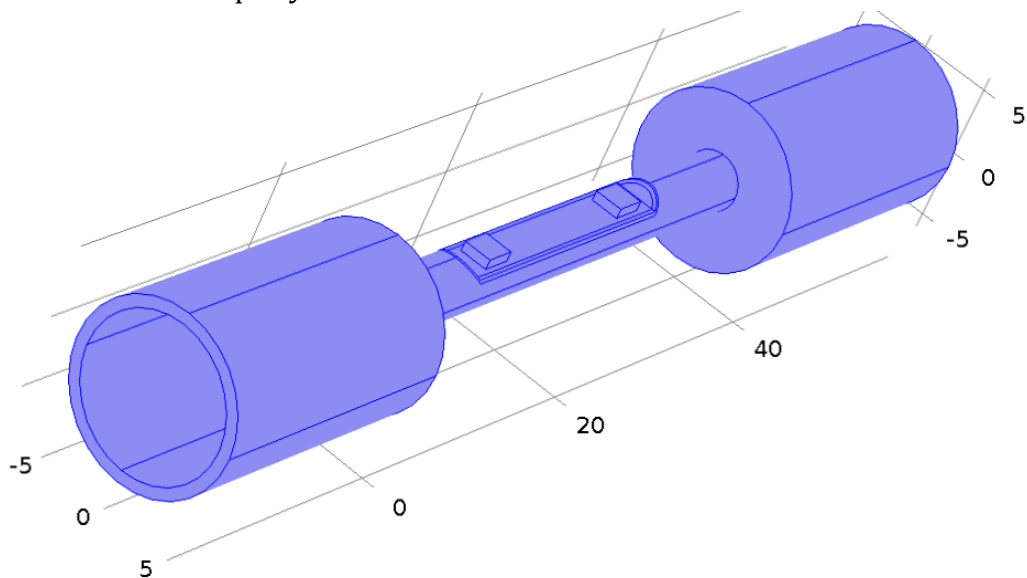
Po simulaci byly stanoveny 2 body: uprostřed trubice na straně přítoku a uprostřed trubice na straně odtoku vody. Mezi těmito dvěma body byl vypočten diferenční tlak pro více než 3 dekády průtoku, všechny průběhy jsou od počátku kvadratické. Hodnoty spočteného tlaku na sebe sedí jen řádově.



Obr. 25: Tlakové ztráty pro jednotlivé moduly

#### 5.4. Simulace proudění v trubičce snímače

Pro simulování jevů na samotném snímači byl sestrojen co nejvěrnější model snímače. Celý model je plně parametrizovaný, lze tedy měnit jak měřítko modelu, tak velikosti a umístění jednotlivých komponent. Při simulaci je tedy možné zadat například proměnný průřez trubky, proměnnou hloubku vlisu, nebo různé umístění snímačů teploty.

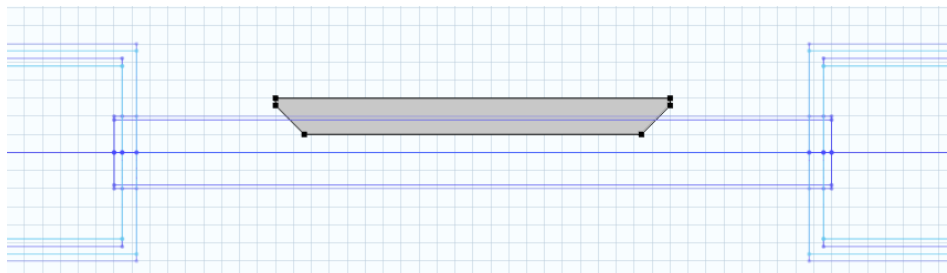


Obr. 26: Kompletní model snímače

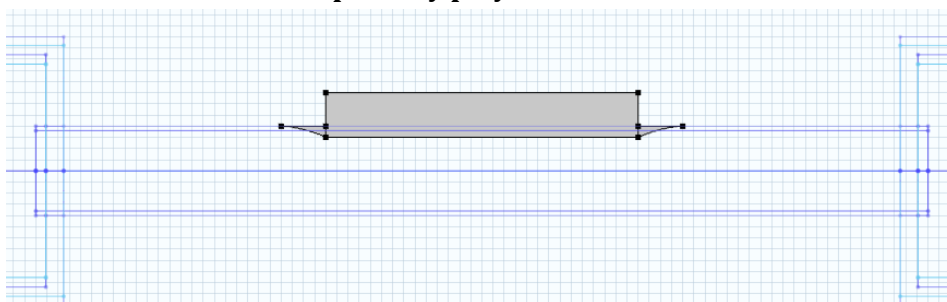


Model snímače se skládá z trubičky snímače s vlisem, snímačů teploty umístěných na vlisu a z přívodních trubek simulujících upevňovací šroubení snímače. Prolis měl nejprve tvar lichoběžníkového výřezu, strany lichoběžníku měly sklon 45°. Tento jednoduchý výřez byl později nahrazen reálnějším tvarem polynomu druhého a nakonec polynomem třetího řádu.

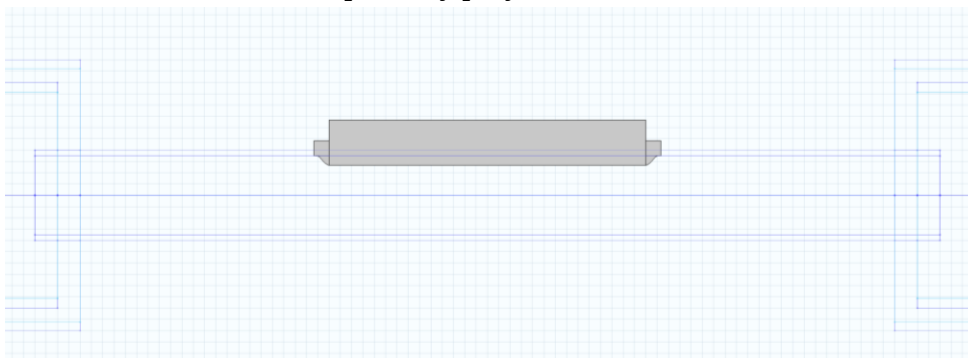
**Lichoběžníkový vlis**



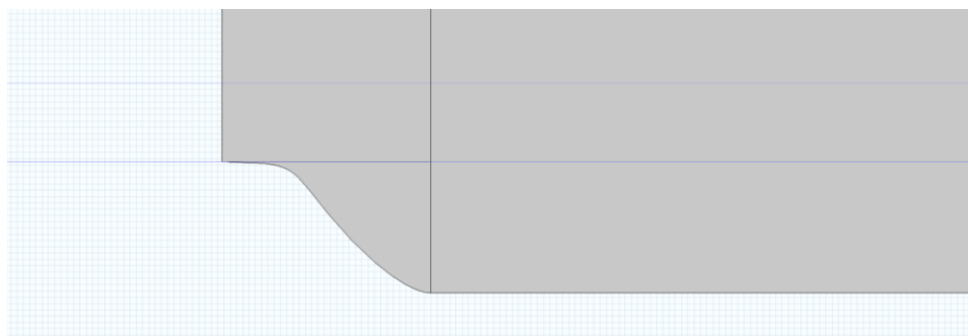
**Vlis upravený polynomem 2 řádu**



**Vlis upravený polynomem 3 řádu**

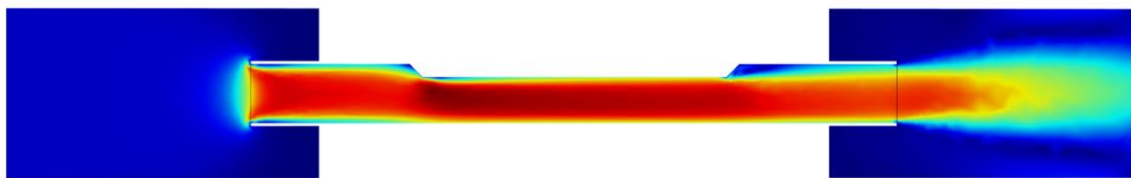


**Detail na hranu vlisu 3 řádu**

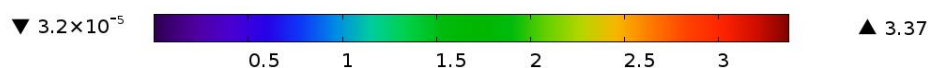
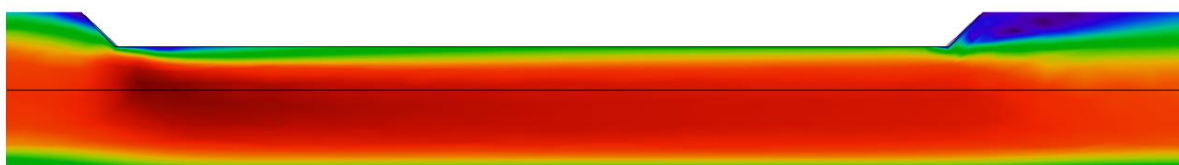


**Obr. 27: Modely vlisu do trubičky**

Na těchto trubičkách snímačů byl odsimulován průběh proudění vody pro různé velikosti průtoku. Z průběhů bylo možné sestavit krátká videa zobrazující jevy na hranách vlisu trubky (viz přílohy kapitola 10). Průtok je vždy zleva doprava.

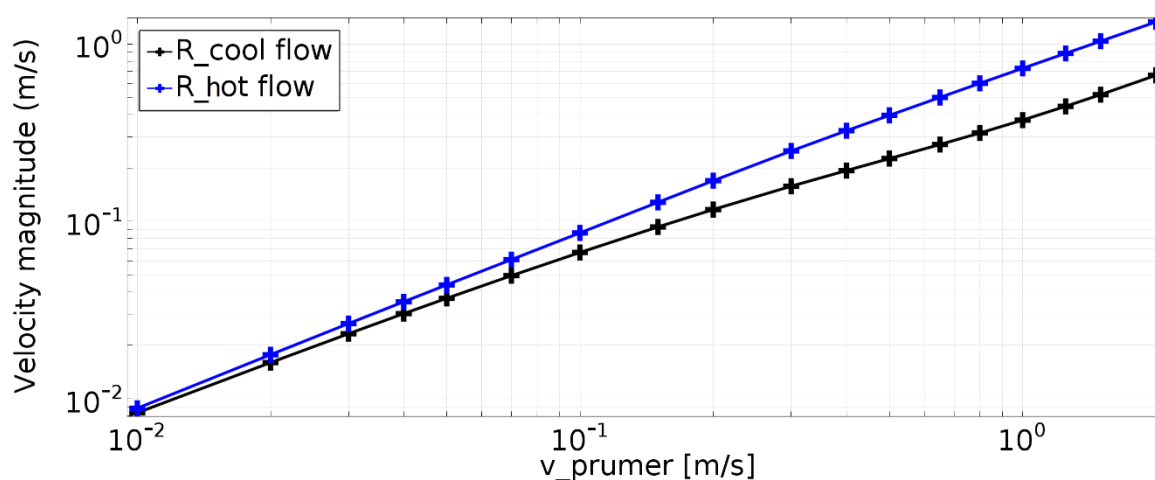


Obr. 28: Průtok trubicou, průměrná rychlost proudění  $v = 3 \text{ m/s}$



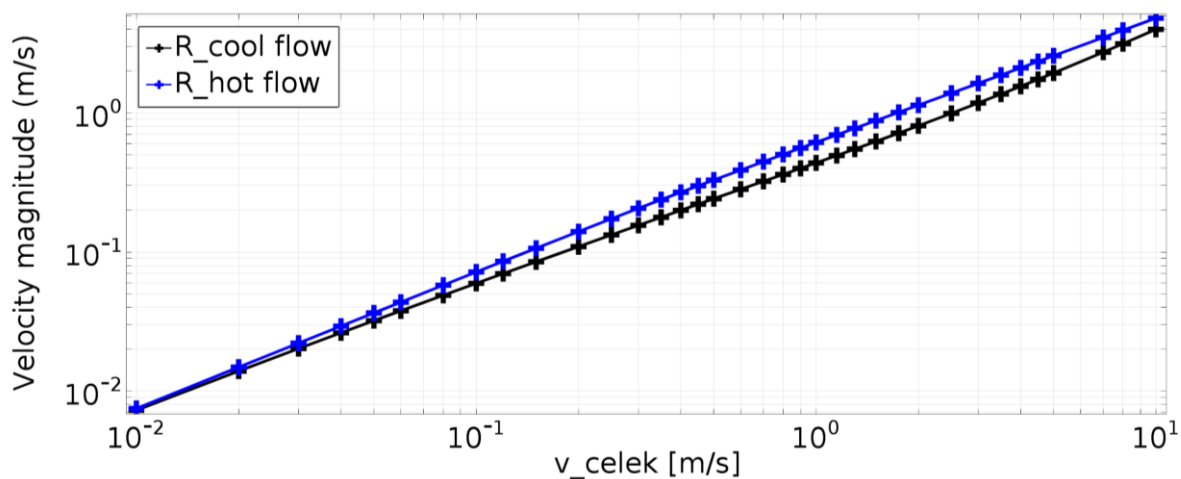
Obr. 29: Detail na lichoběžníkový vlis, hloubka vlisu  $\frac{1}{4}$  průměru, průměrná rychlost  $v = 3 \text{ m/s}$

Při těchto simulacích byla naměřena anomálie v proudění pod místem umístění chladného snímače teploty ( $R_{\text{cool}}$ ). Při zvyšování průtoku přes něj přejde “jazyk”, nebo “kapsa” pomalejšího proudění způsobená hranou vlisu trubky. Nepotvrdil se předpoklad, že tato “kapsa” dojde až k vyhřívanému snímači ( $R_{\text{hot}}$ ) a bude tak ovlivňovat odvod tepla.

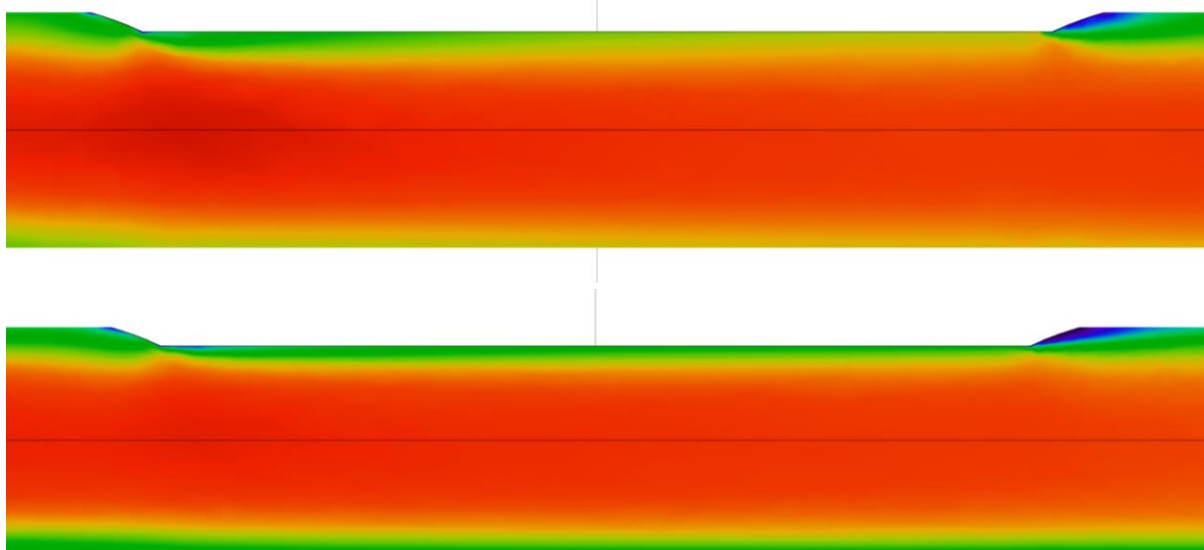


Obr. 30: Anomálie průtoku na hraně lichoběžníkového vlisu

Při dalším zvyšování průtoku se “kapsa” postupně (nikoli skokově) rozprostře na celou délku trubičky, daleko větší vliv při této rychlosti hraje tření na stěnách, na průtoku pod  $R_{hot}$  tak žádný pozorovatelný přechodný děj nebyl nalezen. Ani dokonalejší simulace pro více hodnot, větší rozsah a upravený tvar vlisu na polynom 2. řádu neprokázala přechodný děj pod umístěním snímače  $R_{hot}$ .

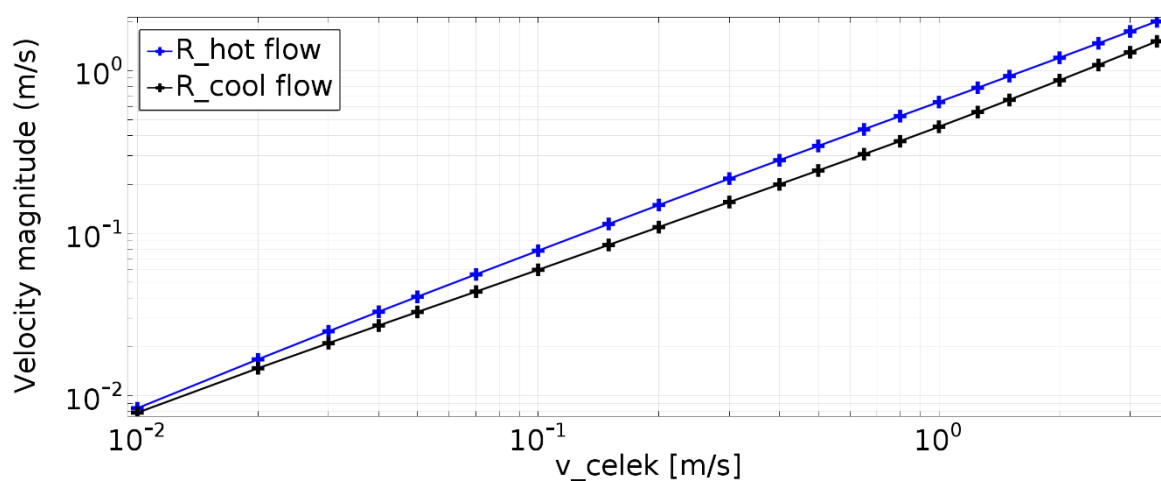


Obr. 31: Velikost průtoků při hraně vlisu aproximované polynomem 2. řádu

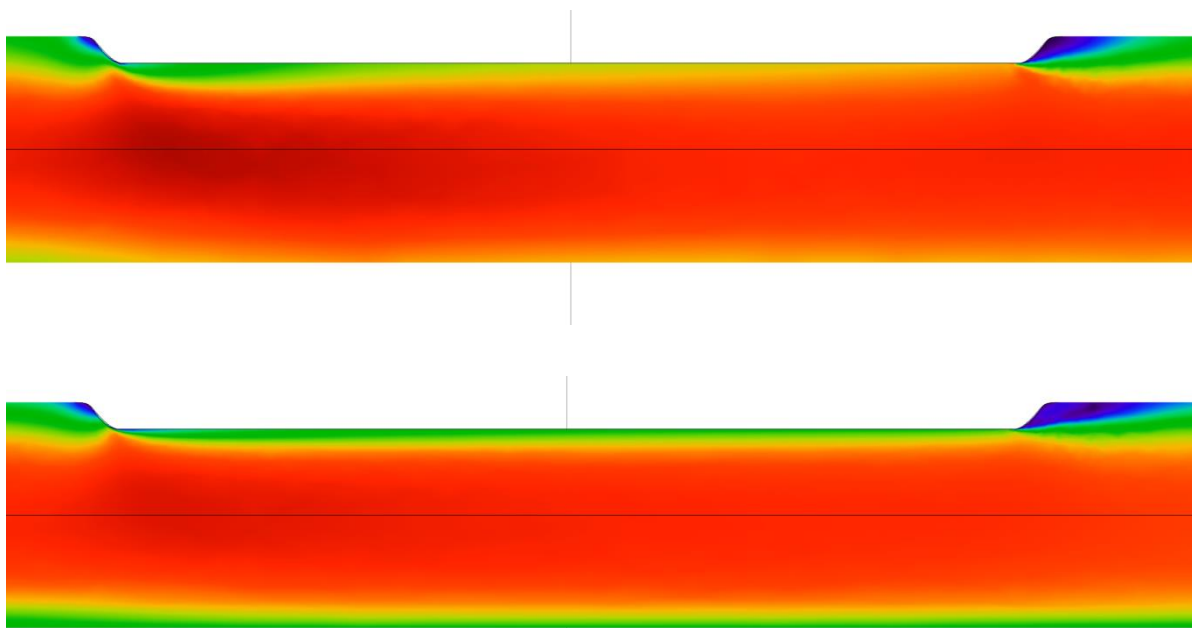


Obr. 32: Details na polynomický vlis 2. řádu, hloubka vlisu  $\frac{1}{8}$  průměru, průměrná rychlost  $v = 0,3$  m/s (horní) a  $v = 3$  m/s (spodní)

Při aproximaci tvaru vlisu polynomem 3. řádu jsou výsledky prakticky shodné s aproximací polynomem 2. řádu.



Obr. 33: Velikost průtoků při hraně vlisu aproximované polynomem 3. řádu



Obr. 34: Detaily na polynomický vlis 3. řádu, hloubka vlisu  $\frac{1}{6}$  průměru, průměrná rychlost  $v = 0,3$  m/s (horní) a  $v = 3$  m/s (spodní)

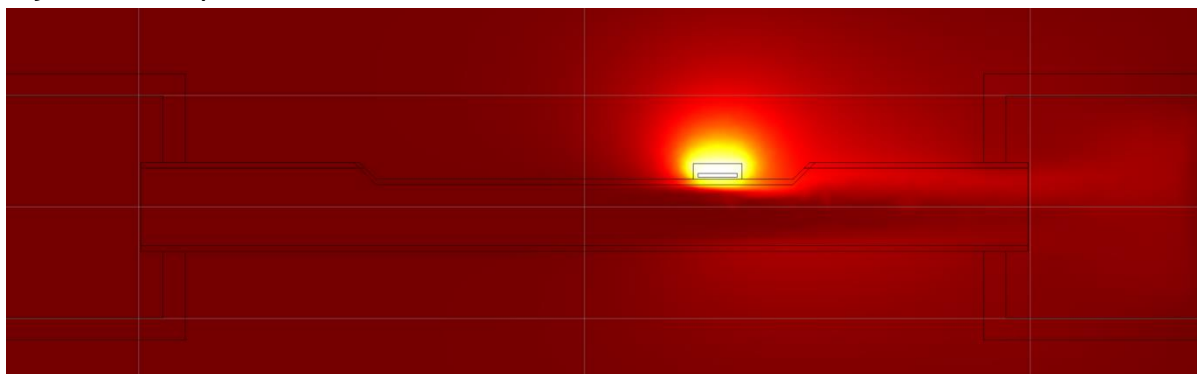
## 5.5. Tepelné toky v programu COMSOL

Pro simulaci tepelných dějů je v programu COMSOL fyzikální modul Heat Transfer obsahující prvky Heat Transfer in Solids a Heat transfer in Fluids. S modulem proudění ho lze propojit pomocí modulu Multiphysics - Non-Isothermal Flow.

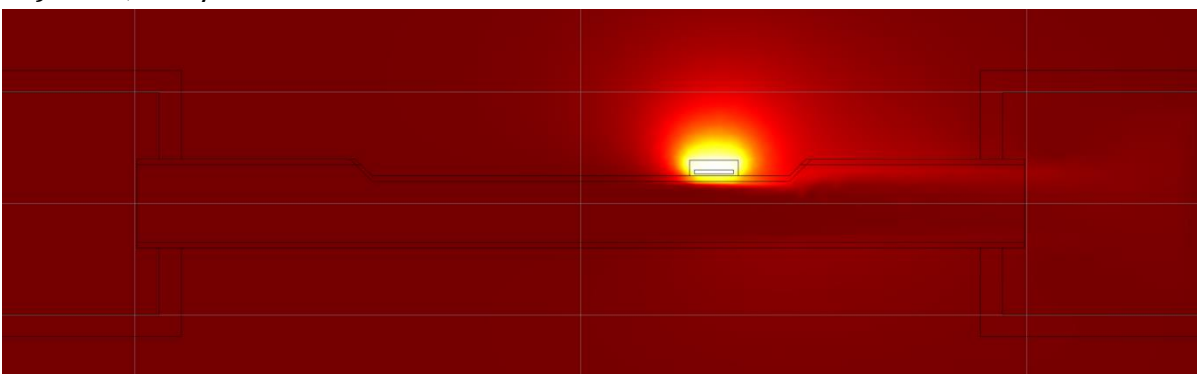
V modulu Heat Transfer lze nastavit objekty jako zdroje tepla ve watttech, dále objekty, nebo plochy s konstantní teplotou, plochy tepelně izolované, nebo tepelné záření jednotlivých ploch a další funkce. Pro účely simulace byl okolo snímače vytvořen válec vzduchu s konstantní teplotou pláště 20°C, čímž byl simulován vliv okolního prostředí. Stejně tak konce potrubí snímače mají teplotu 20°C. Tyto simulace byly výpočetně (a tedy i časově) velmi náročné. Problém byl zejména nasimulovat odvoody tepla tak, aby alespoň řádově seděli s realitou a simulace byla stabilní. Často docházelo k neustálení a tedy i nedořešení simulace, proto byly využity časové studie. Pro nasimulování ustáleného stavu byl čas simulace nastaven o několik řádů nad časovou konstantou snímače. To zabezpečilo dostatečné ustálení tepelných toků.

Ze simulací je zřejmé, že kohřátí vody v trubičce dochází jen pro minimální průtoky, pro větší průtoky (které byly prakticky měřeny) je gradient teploty ve vodě v podstatě nulový.

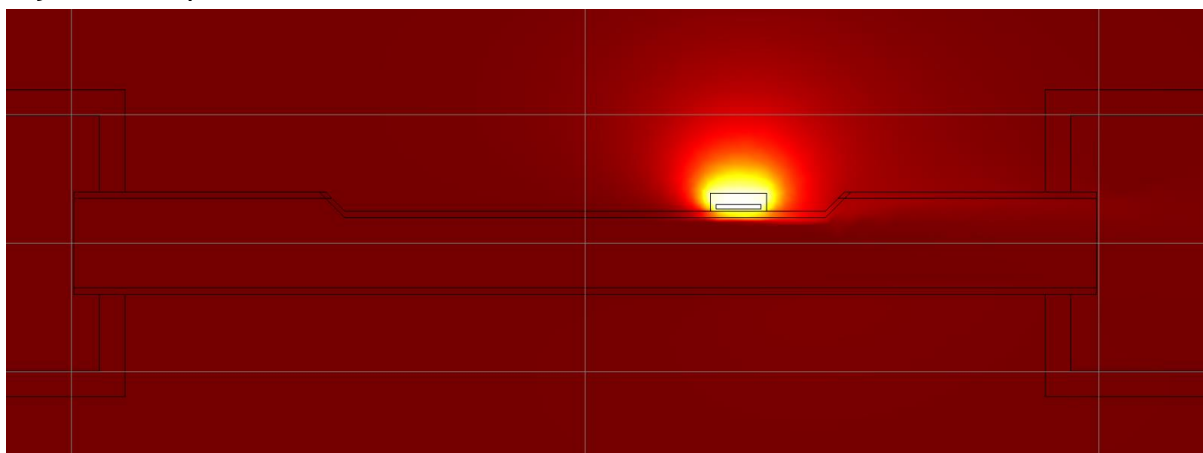
**a)  $v = 0,01 \text{ m/s}$**



**b)  $v = 0,03 \text{ m/s}$**



c)  $v = 0,1 \text{ m/s}$



**Obr. 35: Teplotní pole pro rozdíl teplot  $dT = 50^\circ\text{C}$  a tři hodnoty průtoku**

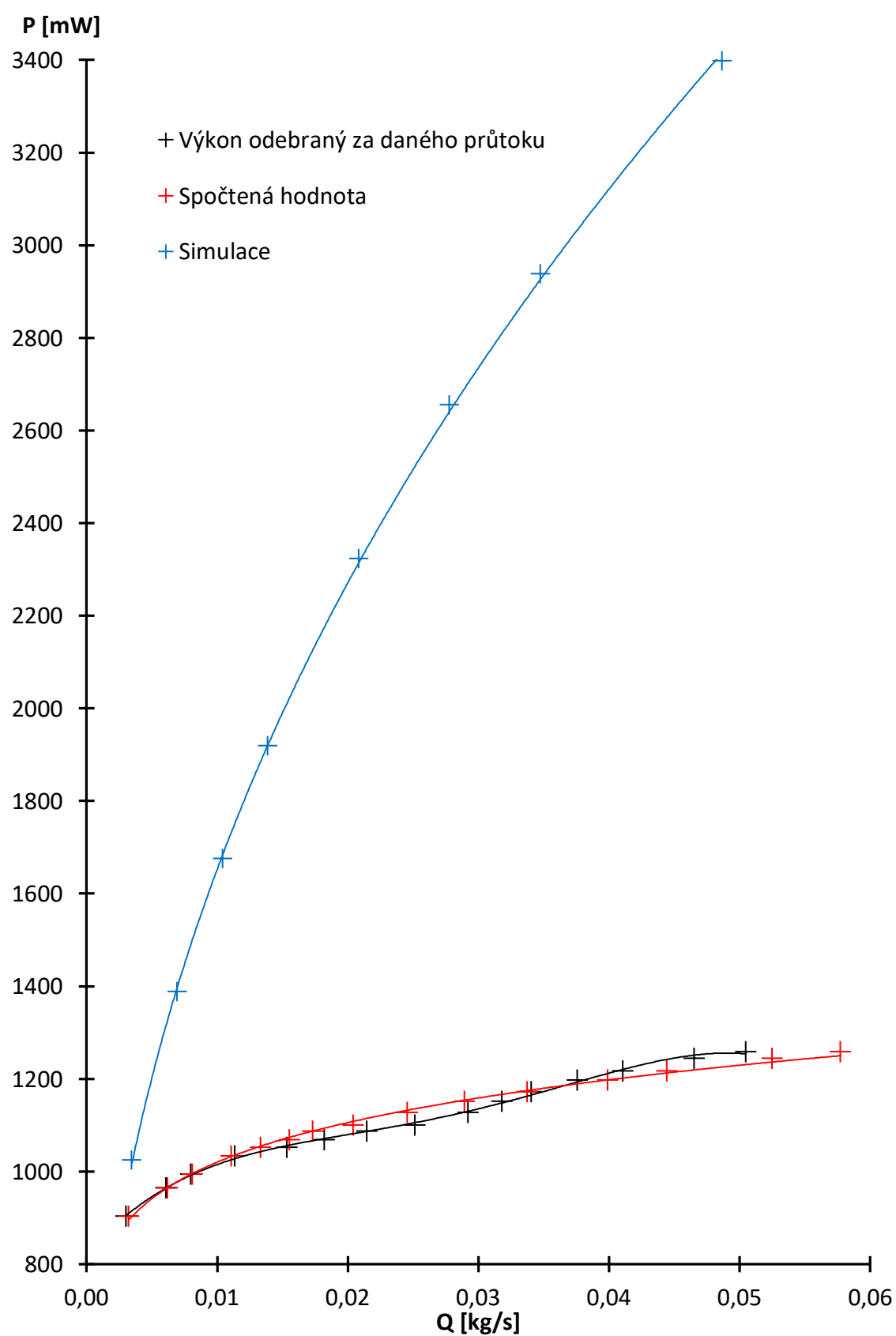
Trubička snímače má v zúžení průřez zhruba  $8 \text{ mm}^2$ , střední rychlost průtoku  $0,1 \text{ m/s}$  tedy odpovídá průtoku zhruba  $2,9 \text{ kg/h}$ , což je téměř o jeden řád pod dolní hranicí měření. Nad tento průtok už teplotní pole vykazuje jen minimální změny.

Z charakteristiky modelu snímače je zřejmé, že přestupy tepla v simulaci jsou značně větší, než reálně naměřené přestupy (Obr. 36). Tepelné ztráty systému jsou bez přítomnosti proudění značně menší než reálně měřené ztráty (parametr  $A_0$  je v simulaci malý), naproti tomu ztráty prouděním jsou značné (parametr  $B_k$  je v simulaci větší, než ten reálně měřený). Proběhl pokus o přidání tepelně špatně vodivé plastové plošky mezi trubičku a vyhřívaný prvek, která by simulovala přilepení snímače k trubičce. To by mělo vést k menším tepelným ztrátám vlivem proudění a tedy i ke zploštění charakteristiky snímače. Pro výpočetní náročnost simulace nebylo možné tento výpočet provést. Tenká ploška izolantu potřebovala velmi jemnou strukturu, aby skrze ni mohl být simulován tepelný tok. Zjemnění struktury jednoho prvku vyžaduje srovnatelně jemnou strukturu i u sousedních prvků, jinak nedojde ke správnému navázání prvků na sebe.

**Tab. 14: Srovnání simulovaného a měřeného snímače**

	$A_0$	$A\alpha$	$B_k$	$B_{\text{exp}}$
Simulace	0,0580	0,00833	24,47	0,0403
Měření (izolovaný snímač)	6,027	0,00272	2,358	0,333

Význam symbolů v tabulce je shodný s rovnicí (r. 21).



Obr. 36: Srovnání simulované a naměřené charakteristiky

## 5.6. Zhodnocení provedených simulací

V simulacích průtoku nebyl zaznamenán jev, který působí zlom v měřených charakteristikách snímače. Určité naznačení nějaké změny proudění je patrné jen na Obr. 30, tato změna proudění ovšem zasahuje pouze oblast chladného snímače a nemá tedy vliv na odběr tepla ze snímače vyhřívaného. Tato anomálie se vyskytuje pouze u lichoběžníkového vlisu, tedy vlisu s ostrými hranami. U reálnějších oblých tvarů se již nevyskytuje.

Simulace tepelných toků ukázala, že už v případě minimálního průtoku nedochází k ohřívání větší vrstvy vody, ani k prohřátí pláště trubičky. Tyto jevy lze tedy zřejmě zanedbat a není třeba je v modelu snímače uvažovat. V simulacích se vyskytly problémy s příliš malým odvodem tepla do okolí a naopak příliš velkým převodem tepla do trubičky snímače. Z důvodů popsaných v kapitole 5.5 nebyly tyto problémy zcela vyřešeny.

Souběžná simulace průtoku vody i tepelných toků byla na hranici výpočetních možností využitého školního počítače. Z odsimulovaných průběhů je zřejmé, že model by potřeboval určité úpravy ve smyslu závěru kapitoly 5.5, aby simulované výkony odpovídaly výkonům reálně měřeným.

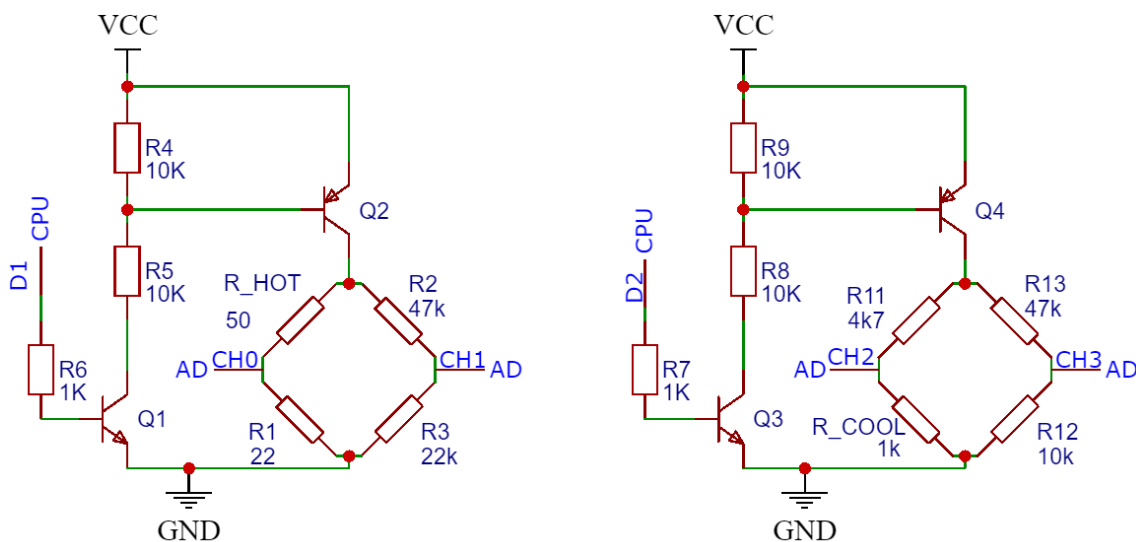
Ze závislostí získaných simulací nevyplývá příčina zlomu v charakteristice snímače a simulovaná data žádný takový zlom neobsahují.



## 6. Elektronika

### 6.1. Měřicí můstky

Pro automatizované měření průtoku je vhodnější využít můstkové zapojení snímačů teploty. Návrh tedy počítá se zapojením dvou můstků, jeden pro  $R_{hot}$  a druhý pro  $R_{cool}$ . Pro dosažení co největší přesnosti je potřeba, aby na můstcích vznikala co největší úbytek napětí. Vhodným řešením tedy je napájet rezistory pomocí pulsně šířkové modulace (dále jen PWM), čímž se zajistí maximální možný úbytek napětí na měřeném odporu v okamžik měření, ale střední hodnota napětí může být značně nižší. Další výhodou PWM jsou výrazně menší výkonové ztráty na spínacích prvcích. Toto se uplatní především u můstku pro  $R_{hot}$ . Odpor  $R_{cool}$  není vyhříván, nemusí být tedy napájen pomocí PWM, lze ho napájet pouze v okamžicích měření.



**Obr. 37: Schéma zapojení můstků**

Schématu byla kreslena a částečně simulována v online aplikaci EasyEDA. [10]  
Vzhledem k použitému AD převodníku není možné překročit napětí 5 V proti zemi na jeho vstupech, proto je třeba spínat PWM přes PNP tranzistor, jak je uvedeno na schématu Obr. 37. a měření napětí provádět na rezistoru s nižší hodnotou odporu. To umožní napájet obvod i napětím 12 V, nebo 15 V, což je potřeba pro vyhřátí rezistoru  $R_{hot}$  na požadované rozdíly teplot. Můstek pro  $R_{cool}$  je možno napájet nižším napětím, například 5 V. Všechny tranzistory jsou pouze spínací a nejsou na ně tedy kladeny žádné nároky na přesnost zesílení. Pouze tranzistor Q2 musí zvládnout spínat dostatečně velký kolektorový proud, přibližně  $I_c = 150$  mA. Při výpočtu neznámého rezistoru v můstku je třeba znát zbylé tři rezistory, dále napájecí napětí můstku  $U_c$  a diferenční napětí na můstku  $U_0$ . Z Kirchhoffových zákonů a Ohmova zákona lze přímo vyjádřit vztah pro neznámý rezistor:

$$R_x = \frac{R_1}{\frac{1}{\frac{R_3}{R_2 + R_3} + \frac{U_0}{U_c}} - 1} \quad (\text{r. 22})$$

kde  $R_1, R_2$  a  $R_3$  jsou rezistory dle Obr. 37 [ $\Omega$ ]

$U_0$  je rozdílové napětí na můstku [V]

$U_c$  je celkové napětí na můstku [V]

Takovéto můstkové zapojení obou snímačů umožňuje využití běžných rezistorů bez nutnosti vysoké třídy přesnosti nominálního odporu. Stejně tak lze počítat neznámí odpor pouze z jedné větve můstku jako děliče napětí a druhou větev můstku využít pro odečet napájecího napětí můstku. Tímto způsobem lze zjistit hodnotu odporu měřeného rezistoru bez nutnosti diferenčního převodníku a přesných napěťových referencí, metoda je ovšem méně přesná.

## 6.2. Diferenční AD převodník MCP3302/04-B

Pro realizaci měření můstků byl vybrán diferenční AD převodník MCP3304-B. Jedná se o 13 bitový převodník s čtyřmi diferenčními kanály, případně osmi singel kanály měřenými proti zemi. Výstupem převodníku je 12 datových bitů a jeden znaménkový bit, ten se uplatní pouze při diferenčním čtení. V závislosti na nastaveném rozsahu je citlivost převodníku od 98  $\mu\text{V}$  pro rozsah  $\pm 400 \text{ mV}$  do 1.22 mV pro rozsah  $\pm 5 \text{ V}$ .

Komunikace s převodníkem je kompatibilní s SPI sběrnici. Maximální takt sběrnice je 2 MHz, čímž převodník dosáhne teoreticky rychlosti až 100 ksps. Rychlost převodníku je potřeba pro odečet hodnot z PWM. [11]

Převodník je využíván jednak k měření diferenčního napětí můstku, dále pak k měření napětí na odporu  $R_3$  vůči zemi, z čehož lze dopočítat napájecí napětí můstku  $U_c$ . Předpokládá se i další využití volných kanálů, např. pro měření vstupního napětí  $U_{cc}$ , nebo úbytků na spínacích tranzistorech.

Díky nastavitelnému rozsahu může dojít k dalšímu zpřesnění měření, z úbytků na  $R_{hot}$  vyplývá, že při vhodném nastavení rezistorů v můstku může být rozsah převodníku snížen na  $\pm 1 \text{ V}$ , čímž by se při měření využil téměř celý rozsah převodníku.

## 6.3. Procesor ATmega328p

Pro realizaci zpracování dat z AD převodníku a regulace teploty na  $R_{hot}$  pomocí PWM byl zvolen jednoduchý a relativně levný microcontroller ATmega. Jedná se o 8 bitový procesor s 3 V, nebo 5 V logikou. Takt procesoru je 16 MHz, což umožňuje komunikaci s AD převodníkem přes SPI na 2 MHz. Přes rozhraní USART procesor komunikuje s PC a je možný vypisovat debugovací výpisy i data. Procesor je také schopný komunikovat přes I<sup>2</sup>C sběrnici. [12]

Výhodou vybraného procesoru je jeho využití v projektu Arduino, což usnadňuje vývoj a testovací zapojení na nepájivém poli. V konečné aplikaci bude samozřejmě vhodnější využít procesor samostatně bez platformy Arduino.

Na ověření funkce snímače byly naprogramovány jednoduché knihovny pro komunikaci procesoru s AD převodníkem a pro regulaci teploty PI regulátorem skrze PWM. Dále byl implementován algoritmus na zjišťování hodnoty jednotlivých napětí na můstcích a na výpočet odporů. Vlivem výrazných šumů na nepájivém poli a šumům na kabelech od měřicí aparatury nebylo možné provést přesná měření. Bude potřeba modul napájet na pevný plošný spoj a zapojit co nejblíže měřicí trubičce snímače. Další možností jak lze zpřesnit měření je průměrovat několik měřených hodnot, zvolený AD převodník má dostatečnou rychlost čtení i převodu dat na to, aby zvládl odměřit a přenést například 10 hodnot a procesor poté vyhodnotil jejich validitu. Možné je i zapracování postupných filtrů.

## 7. Závěr

Návrh snímače provázeli nečekané potíže s anomáliemi v převodní charakteristice řešené v kapitolách 3 a 4. Ani simulace v kapitole 5 neprokázaly původ těchto anomálií. Snímač je ovšem možné provozovat do průtoku 0,03 kg/s, respektive do 1,8 l/min a to s přesností do 2% z rozsahu.

Pro vyšší průtoky by bylo nutné zvětšit průřez trubičky snímače. Je možné předpokládat, že při zvětšení průřezu trubičky nebude k anomálii docházet, nebo až pro výrazně větší průtoky, protože rychlost v trubičce bude nižší. Žádný jiný parametr, krom rychlosti vody, zřejmě nehraje v měřené anomálii roli.

Geometrie snímače celkově nahrává parazitním vlivům,  $R_{hot}$  topí do okolního prostředí a odvod tepla z něj je tedy prostředím ovlivněn, to má přímý vliv na měřený průtok. Dále je třeba velmi přesně vyhodnocovat napětí na obou snímačích. Z napětí na snímačích se určuje teplota, která je ve výsledném vztahu obsažena v druhé mocnině, dále pak výkon na rezistoru (kde je měřené napětí vyjádřením z Ohmova zákona v druhé mocnině) a následně je umocněn i rozdíl výkonů, viz (r. 21). Toto klade enormní nároky na přesnost odečtu napětí.

Elektronický modul pro automatické vyhodnocení měření byl navrhnut, sestojen a naprogramován. Z důvodů omezeného přístupu do laboratoří nebylo možné ho plně otestovat. Vzhledem k tomu, že rozdíly napětí jsou při měření relativně malé, je pro přesný chod snímače nezbytné, aby byl elektronický modul umístěn v bezprostřední blízkosti snímací trubičky a tím se zabránilo nežádoucímu šumu, který způsobuje velkou chybu měření.

Dále je možné zlepšovat vyhodnocující algoritmus pomocí implementace různých číslicových filtrů. Na jejich přesný návrh by byla potřeba detailnější měření šumu na již zkompletovaném prototypu snímače.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Redukce průměru potrubí [5] .....	11
Obr. 2: Model trubičky snímače.....	13
Obr. 3: Chyba měření přístroje MASS2100 .....	17
Obr. 4: Parametr A čidla P0K050 vypočtený pomocí referenčního měřidla .....	20
Obr. 5: Potřebný příkon pro $dT = 10^{\circ}\text{C}$ v závislosti na velikosti průtoku .....	21
Obr. 6: Potřebný příkon pro $dT = 40^{\circ}\text{C}$ v závislosti na velikosti průtoku .....	22
Obr. 7: Parametr B v závislosti na průtoku.....	24
Obr. 8: Rozdíl teploty naměřené snímačem KTG2 vůči teplotě kalibrační pece.....	27
Obr. 9: Rozdíl teploty naměřené snímačem P1K0 vůči teplotě kalibrační pece.....	27
Obr. 10: Parametr A čidla P0K050 vypočtený pomocí referenčního měřidla pro izolované čidlo .....	32
Obr. 11: Parametr B v závislosti na průtoku pro izolovaný snímač.....	34
Obr. 12: Potřebný příkon pro $dT = 51,4^{\circ}\text{C}$ v závislosti na velikosti průtoku, izolovaný snímač .....	35
Obr. 13: Tlakové ztráty na trubičce snímače P1K0/050 v závislosti na velikosti průtoku.....	37
Obr. 14: Tlakové ztráty na trubce snímače FUJI v závislosti na velikosti průtoku ..	37
Obr. 15: Porovnání měřené základní charakteristiky (červená) s vypočtenou charakteristikou (černá), izolovaný snímač, $dT = 51,4^{\circ}\text{C}$ .....	40
Obr. 16: Velikost relativní chyby z rozsahu pro Obr. 15 a rozsah 0,005 až 0,053 kg/s .....	40
Obr. 17: Dosah víření po redukci potrubí v závislosti na rychlosti proudění [5] .....	41
Obr. 18: Rozdělení charakteristik na dvě funkce, izolovaná snímač, $dT = 51,4^{\circ}\text{C}$ ...	42
Obr. 19: Velikost relativní chyby z rozsahu pro Obr. 18, rozsah 0,005 až 0,053 kg/s .....	42
Obr. 20: Zkušební trubka .....	45
Obr. 21: Ukázka průřezu modelem trubky rozdělené na jednotlivé prvky.....	45
Obr. 22: Průřezy trubkou pro různé moduly proudění, $v = 0,1 \text{ m/s}$ .....	46
Obr. 23: Průtokový profil pro modul Turbulent Low Re (shodný s laminárním modulem), $v = 0,1 \text{ m/s}$ .....	47
Obr. 24: Průtokový profil pro modul Turbulent, $v = 0,1 \text{ m/s}$ .....	47
Obr. 25: Tlakové ztráty pro jednotlivé moduly .....	48
Obr. 26: Kompletní model snímače .....	48
Obr. 27: Modely vlisu do trubičky .....	49
Obr. 28: Průtok trubkou, průměrná rychlost proudění $v = 3 \text{ m/s}$ .....	50
Obr. 29: Detail na lichoběžníkový vlis, hloubka vlisu $\frac{1}{4}$ průměru, průměrná rychlost $v = 3 \text{ m/s}$ .....	50
Obr. 30: Anomálie průtoku na hraně lichoběžníkového vlisu .....	50

Obr. 31: Velikost průtoků při hraně vlisu aproximované polynomem 2. řádu .....	51
Obr. 32: Detaily na polynomickeý vlis 2. řádu, hloubka vlisu $\frac{1}{8}$ průměru, průměrná rychlost $v = 0,3$ m/s (horní) a $v = 3$ m/s (spodní) .....	51
Obr. 33: Velikost průtoků při hraně vlisu aproximované polynomem 3. řádu .....	52
Obr. 34: Detaily na polynomickeý vlis 3. řádu, hloubka vlisu $\frac{1}{6}$ průměru, průměrná rychlost $v = 0,3$ m/s (horní) a $v = 3$ m/s (spodní) .....	52
Obr. 35: Teplotní pole pro rozdíl teplot $dT = 50^{\circ}\text{C}$ a tři hodnoty průtoku .....	54
Obr. 36: Srovnání simulované a naměřené charakteristiky .....	55
Obr. 37: Schéma zapojení můstků .....	57

## 8. Seznam tabulek

Tab. 1: Změny tepelné vodivosti a hustoty vody v závislosti na teplotě [3], [4].....	16
Tab. 2: Měření parametru A na snímači P0K050 .....	18
Tab. 3: Naměřené teploty pro všechny snímače a jejich rozdíly teplot.....	19
Tab. 4: Měření parametru B pro $dT = 37,7^{\circ}\text{C}$ .....	23
Tab. 5: Kalibrace snímačů .....	26
Tab. 6: Doba odezvy na změnu průtoku snímače P0K050 - zavření kohoutu .....	29
Tab. 7: Doba odezvy na změnu průtoku snímače P0K050 - otevření kohoutu .....	29
Tab. 8: Doba odezvy na změnu průtoku snímače P0K050 - z nenulového na plný. 30	
Tab. 9: Měření parametru A na snímači P0K050, izolovaný snímač .....	31
Tab. 10: Měření parametru B pro $dT = 51,4^{\circ}\text{C}$ , izolovaný snímač .....	33
Tab. 11: Tlakové ztráty v závislosti na průtoku.....	36
Tab. 12: Výpočet Reynoldsova čísla pro trubičku snímače P1K0/050.....	38
Tab. 13: Výpočet Reynoldsova čísla pro trubku snímače FUJI .....	38
Tab. 14: Srovnání simulovaného a měřeného snímače.....	54

## 9. Seznam literatury

- [1] ČSN EN 60751: Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [2] Univerzální kabelové snímače teploty se závitem. SENSIT s.r.o. [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2013, 2014 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <http://www.sensit-kolejovavozidla.cz/shop/univerzalni-kabelove-snimace-teploty-se-zavitem/stsz.html>
- [3] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla [online]. 2001 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>
- [4] BUREŠ, Jiří. Hustota vody. ConVERTER - převody fyzikálních jednotek [online]. 2002 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [5] Základní pojmy a definice. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005, s. 23-41. Senzory nelinektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.
- [6] Tepelné průtokoměry. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005, s. 275-293. Senzory nelinektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.
- [7] BUREŠ, Jiří. Viskozita vody. ConVERTER - převody fyzikálních jednotek [online]. 2002 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>
- [8] Kingova rovnice: OLIN, PH.D, John G. A STANDARD FOR MANUFACTURERS OF THERMAL DISPERSION MASS FLOW METERS. Sierra Instruments, Inc.: CEO, Founder. October 15, 2008.
- [9] Program COMSOL Multiphysics. COMSOL [online]. 2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/products>



- [10]** *EasyEDA* [online]. China: Shenzhen Lichuang E-commerce Co., 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://easyeda.com/>
- [11]** MCP3302/04. In: *Microchip Technology* [online]. USA, April 2011 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21697F.pdf>
- [12]** ATmega328P. In: *Microchip Technology* [online]. San Jose, CA 95110 USA, 2015 [cit. 2020-06-07].  
Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)

## **10. Seznam příloh**

### **10.1. Měření**

Příloho 1. Soubor s měřenými daty „P1K0\_P0K050-prvni\_snimac.xlsx“

Příloho 2. Soubor s měřenými daty „P1K0\_P0K050-druhy\_snimac.xlsx“

Příloho 3. Soubor s měřenými daty „Tlakové\_ztraty.xlsx“

### **10.2. Simulace**

Příloho 4. Charakteristiky simulovaného snímače „COMSOL\_charakteristiky.xlsx“

Příloho 5. Závislost rychlosti toku na poloze v trubce z programu COMSOL  
„Prutok\_trubkou\_na\_Rhot-ruzne\_vysky.png“

Příloha 6. Video z programu COMSOL „Side\_cut-relative\_flow.avi“

Příloha 7. Video z programu COMSOL „Surface-relativ\_flow.avi“

Příloha 8. Tabulka se simulovanými daty „test\_pipe.xlsx“

### **10.3. Program**

Příloha 9. Projekt „TermalFlowMeter“ pro prostředí Arduino IDE